

Б.Г. Шерстюков

**Изменения, изменчивость
и колебания климата**

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»

Обнинск 2011

УДК 551.583

Шерстюков Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011.

Затронуты важнейшие вопросы современной климатологии, без которых нельзя ответить на вопросы, почему изменяется климат и каким будет климат последующих десятилетий. Наиболее подробно обсуждается реальность антропогенного фактора и обоснованность прогнозов о грядущей термической катастрофе Земли.

На основе анализа эмпирических данных показано, что в последние годы парниковый эффект от возрастающей концентрации CO_2 усиливается, но его вклад в изменения климата не является основным. Показано, что вопрос о причинах изменений климата сводится к вопросу о внешних факторах.

Рецензент: доктор географических наук, профессор
Ю.П. Переведенцев

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Глобальный и региональный климат атмосферы	9
1.1. История обнаружения изменений климата и терминология	9
1.2. Изменения и колебания глобальной температуры	17
1.3. Пространственные особенности изменения температуры (тренды) за 1976–2010 г.	23
1.4. Изменения изменчивости температуры	30
1.5. Главные вопросы об изменении климата	41
Глава 2. Изменения в океане и климат атмосферы	79
2.1. О влиянии океанов на колебания климата	79
2.2. Инерционность элементов климатической системы	85
2.3. Инерционность годового хода температуры и изменения климата	89
2.4. Инерционность и изменчивость климата	93
2.5. Изменение инерционности климатической системы при изменении скорости осевого вращения Земли	96
2.6. Углекислый газ в океане	97
2.7. Универсальные методические замечания к статистическому анализу	98
Глава 3. Космические основы формирования и колебаний климата планеты	107
3.1. Солнечная радиация – основа формирования климата	107
3.2. Сведения о климатогенных возмущениях в параметрах движения системы Земля–Луна	111
3.3. Лунные возмущения вращения Земли	115

3.4. Лунные возмущения в изменениях атмосферного давления	118
3.5. Лунные возмущения в изменениях температуры воздуха	126
3.6. Климатогенные возмущения движения Земли планетами	131
3.7. Сезонные вариации в расстоянии от Земли до Солнца и в глобальной температуре	136
3.8. Аномалии ускорения движения Земли и сезонные аномалии температуры	142
3.9. Диссимметрия Солнечной системы	145
3.10. Солнечная активность и инерционность климатической системы	149
3.11. Циклы Миланковича	149
3.12. Резонансы в Солнечной и климатической системах	150
Глава 4. Парниковый эффект в изменениях климата	179
4.1. Парниковые газы антропогенного происхождения	179
4.2. Условия проявления парникового эффекта	182
4.3. Сезонный ход радиационного баланса, трендов температуры воздуха, количества облачности	186
4.4. Широкий ход радиационного баланса и трендов температуры	193
4.5. Значение облачности в современных изменениях климата России	195
Глава 5. Физико-математические модели климата	207
5.1. Предсказуемость климата	207
5.2. Физико-математические модели климата, построение и принципы согласования с данными наблюдений	210
5.3. Оценки точности моделей	218
5.4. Естественные колебания климата в моделях	226
5.5. Оценки вклада CO ₂ в современные изменения климата	228

Глава 6. Статистическая модель климата	235
6.1. Собственные, вынужденные и вынуждающие колебания	235
6.2. Периодичность, цикличность, ритмичность	239
6.3. Сезонный частотный фильтр ритмов	241
6.4. Ритмы климатической системы	248
6.5. Выделение скрытых ритмов	252
6.6. Статистическая модель климата на основе ритмов	259
6.7. Исследование статистической модели климата	264
6.8. Сравнение ошибок статистической модели климата с ошибками обобщенной физико-математической модели	269
6.9. Модель климата на основе совмещения физико-математической модели климата и статистической модели ритмов	271
6.10. Оценки ошибок прогноза погодичных колебаний климата Северного полушария	273
Заключение	281
Список использованной литературы	284

Введение

Уже более сорока лет продолжается научная дискуссия об изменении климата. Первая половина этого срока ушла на то, чтобы ответить на вопрос: «Климат изменяется, или наблюдения показывают случайные флюктуации климата?» Параллельно шло обсуждение вопроса: «Если потепление не случайно, то каковы причины этого потепления?» Вспомнили о давних гипотезах возможности изменения радиационного баланса Земли за счет антропогенного увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере. Активизировались работы по мониторингу состояния климата и по созданию моделей общей циркуляции атмосферы для проведения численных экспериментов по оценке чувствительности климатической системы на наблюдаемые изменения концентрации углекислого газа в атмосфере.

На рубеже столетий, по данным мониторинга, убедительно доказано, что в конце XX века произошло глобальное потепление климата. К этому же времени модельные оценки показали реальность воздействия повышения концентрации CO_2 на глобальный климат, но этот результат не был столь убедительным. По многим признакам, изменения климата в XX веке содержали сильную естественную составляющую, а парниковый эффект был преувеличен по моделям с неоправданно завышенной чувствительностью к изменению концентрации CO_2 . Однако международная группа экспертов [96] пришла к заключению о том, что потепление климата во второй половине XX века имеет преимущественно антропогенное происхождение. На этом дискуссия не закончилась, а только обострилась.

В одной из своих работ А.С. Монин отметил: «Климат – понятие глобальное, и проблема его изменений – глобальная проблема, решение которой требует синтеза многообразных знаний из различных отраслей наук о Земле и физико-математических наук» [57].

Вопросы исследований причин изменений климата выходят за рамки климатологии, океанологии, геологии и других наук о Земле,

они включают астрономию, геомагнетизм, физику космоса, солнечно-земную физику. В настоящей монографии собраны главные сведения о современном состоянии вопроса по проблеме изменений климата от терминологии и исследования причин изменений климата до методов прогноза климата.

Обращено внимание на то, что необоснованное заключение экспертов, по сути, завело современную климатологию в тупик. Не отвергая наличия парниковой составляющей в современных изменениях климата, в настоящей монографии приводятся неопровержимые сведения о наличии сильной естественной составляющей в современных изменениях климата. Приводятся доказательства совместного действия парниковой и естественных составляющих на состояние современного климата и предложена статистическая модель климата для прогноза его изменений на два десятилетия.

Описаны авторские исследования свойств колебаний в характеристиках климатической системы, сформулированы новые представления о межсезонных барьерах распространения ритмов в атмосфере, о переменной инерционности атмосферных характеристик, о переменной интенсивности взаимодействия атмосферы и океана и о роли космических факторов в изменениях состояния климатической системы.

Все авторские исследования выполнены на основе анализа результатов метеорологических наблюдений глобальной сети станций, данных наблюдений за состоянием Мирового океана и других данных. Методики обработки исходных данных разрабатывались индивидуально для проверки каждой физической гипотезы, и в этом был залог успеха по вопросам, на которые не было убедительных ответов ранее. Физическая гипотеза всегда должна быть поводом для статистического анализа, а не наоборот. «Бесплодный эмпиризм, регистрирующий лишь флуктуации, ... не может явиться основой для создания общей теории Земли ... – той цели, к которой вольно или невольно стремится вся современная наука» [52]. А для решения проблем климатологии действительно необходима комплексная теория Земли.

Описаны важные методические выводы, полученные на основе понимания вложенных вынуждающих, вынужденных и собственных колебаний в сложных системах. С учетом этого предложено обоснование для статистического моделирования «непредсказуемых» колебаний в температуре воздуха и для статистического прогноза колебаний климата.

Монография состоит из шести глав. Рисунки вынесены из текста и приводятся в конце каждой главы.

Глава 1. Глобальный и региональный климат атмосферы

1.1. История обнаружения изменений климата и терминология

Определение понятий «климат» и «изменения климата» претерпевали изменения в течение нескольких десятилетий. По определению В.Н. Оболенского, под климатом обычно подразумевается среднее состояние атмосферы в данном месте земной поверхности, характеризующее совокупностью средних или нормальных значений всех метеорологических элементов, составленных на основе многолетних наблюдений. Кроме указанных норм, для полной характеристики климата важно знать пределы, в которых колеблются отдельные значения метеорологических элементов около своих средних величин, или, как говорят, изменчивость элементов для данного места [65].

По определению Моница [60], климат – это статистический ансамбль состояний, которые проходит система океан–суша–атмосфера за периоды времени в несколько десятилетий. Периоды времени, указанные в определении климата, необходимо выбирать так, чтобы определяемые по этим периодам средние значения (характеристики климата) были наиболее устойчивыми, т.е. меньше всего менялись бы при переходе от одного такого периода к другому.

Позднее появилось другое определение: «Климат 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» [16].

На основе последнего определения климата можно сформулировать определение для изменений климата. Изменениями климата следует называть изменение во времени состояния климата, которое может быть обнаружено с помощью статистических тестов при анализе средних, экстремумов или показателей изменчивости на разных временных интервалах в течение длительного периода (обычно несколько десятилетий или больше). Изменение климата может быть следствием естественных внутренних процессов климатической системы или результатом внешних воздействий, включая антропогенные воздействия.

Г.В. Груза и Э.Я. Ранькова [16] справедливо указывают, что изменение климата для заданной области или для земного шара в целом характеризуется разностью между некоторыми климатическими переменными для двух заданных интервалов времени. Но, к сожалению, там же употребляют слово «изменчивость» как синоним слова «изменения».

Основным фактором, определяющим климат местности, является солнечная радиация. Количество солнечной энергии, приходящее на единицу поверхности каждого места, зависит от географической широты и сезона года. Приток солнечной радиации в разные времена года и суток определяет так называемый солярный климат. Если бы не существовало других факторов, различия в региональном климате были бы чисто зональными и из года в год повторяющимися. Однако неравномерное распределение суши и океана, рельефные неоднородности суши, растительный покров и многое другое оказывают существенное влияние на солярный климат [65]. К этому следует добавить, что атмосфера является частью климатической системы, которая представляет собой совокупность атмосферы, гидросферы, биосферы и геосферы в их взаимодействии [75]. Кроме сказанного, климат атмосферы еще зависит от состояний и изменяющейся интенсивности взаимодействия с другими составляющими системы. Накоплено много фактов, показывающих, что климатическая система не является замкнутой и подвергается внешним возмущениям.

Долгое время в современной истории климат считался неизменным по своей природе. Но в 20-х гг. появилось много сообщений о

признаках потепления в Арктике. Н.М. Книпович в 1921 г. выявил, что воды Баренцева моря стали заметно теплее. Сначала даже считалось, что это потепление касается только Арктической области. Позднее было отмечено, что это было глобальное потепление. Значительно раньше, чем климатологи, потепление заметили гляциологи, которые уже к концу XIX в. установили заметное отступление ледников в Альпах, на Кавказе и в Скалистых горах Северной Америки [48].

Особенностью потепления было то, что в высоких полярных широтах Северного полушария оно было выражено более четко и ярко. Так, в Западной Гренландии температура повысилась на 5 °С, а на Шпицбергене – даже на 8–9 °С за период от 1912–1926 гг. до конца 1930-х гг. [48].

Наибольшее глобальное повышение средней температуры у поверхности Земли во время кульминации потепления составляло 0,6°С. Горные ледники повсеместно отступали, причем величина отступления исчислялась сотнями метров. На Кавказе, например, общая площадь оледенения сократилась за это время на 10 %, а толщина льда в ледниках уменьшилась на 50–100 м. Арктику образно называли «кухней погоды».

После 40-х гг. стала проявляться тенденция к похолоданию. Льды в Северном полушарии стали снова наступать. В первую очередь это выразилось в росте площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана. С начала 40-х и до конца 60-х гг. площадь льда в Арктическом бассейне возросла на 10 %. Горные ледники в Альпах и на Кавказе, а также в горах Северной Америки, ранее быстро отступавшие, или замедляли отступление, или даже начали снова наступать. Первое в XX веке потепление сменилось непродолжительным и несильным похолоданием. Стали очевидными существенные колебания климата. Начались поиски причин этих колебаний и начался новый этап развития климатологии. Главные усилия климатологов в те годы были направлены на установление причинно-следственных связей между различными метеорологическими и другими характеристиками. Многие результаты исследований тех лет не потеряли своей

значимости до сих пор и заложили основы понимания современной климатологии.

С середины 1970-х гг. началось второе за историю инструментальных наблюдений глобальное потепление, которое получило совсем иную трактовку, связанную с усилением парникового эффекта от антропогенного повышения концентрации углекислого и других парниковых газов в атмосфере.

Потепление климата в 30–40-е гг. XX века имело большое значение для СССР, оно дало мощный толчок в освоении Арктики, в становлении северных границ СССР и в развитии промышленного потенциала высокоширотных регионов. Уже тогда был заложен потенциал основных современных энергоресурсов России. Признание важнейшей роли потепления климата на том этапе истории пришло позднее, однако климатические исследования активизировались уже тогда. Арктика была известна не только как «кухня» погоды, но и как «кухня» геомагнитных бурь, полярных сияний и других явлений, связанных с изменениями солнечной активности. Поэтому много работ было посвящено исследованию влияния внешних факторов на климат. Исследования проводились на основе анализа результатов метеорологических и геофизических наблюдений.

Развитие таких исследований сдерживалось отсутствием технических средств обработки данных. Появление вычислительной техники в 1960–1970-е гг. временно сняло технические ограничения на работу с данными. Повсеместно получили развитие статистические методы анализа данных метеорологических наблюдений с оценкой статистической достоверности результатов. Стали применяться сложные в вычислительном отношении методы, не доступные ранее. Это позволило получить много новой разнообразной статистической информации о структуре изменений климатических характеристик за вековую период. Появилось целое направление – исследование статистической структуры атмосферы в разных пространственно-временных масштабах. Знание структуры было необходимо для обоснования применения тех или иных методов статистического анализа, но знания

о статистической структуре не добавляли понимания физических процессов в атмосфере. Главная цель исследования климата – причинно-следственные связи – отошла на второй план. Успехи статистического анализа на волне компьютеризации расчетов породило ошибочное убеждение в том, что без исследования физики процессов можно статистическими методами описать текущие и будущие изменения климата. Обилие новой статистической информации и отсутствие в то время методов ее правильного обобщения привели к ошибочным утверждениям о том, что изменения климата имеют случайный характер, а их прогноз не имеет смысла. Теория случайных чисел в те годы применялась к анализу метеорологических рядов без достаточных знаний о свойствах этих рядов и о природе колебаний в этих рядах. Таких знаний просто не существовало, этап полноценного понимания причин и свойств естественных колебаний в метеорологических рядах только начинался.

Несколько примеров истории. В статистических исследованиях атмосфера долгое время рассматривалась независимо от других составляющих климатической системы. Предполагалось, что атмосфера обладает набором своих собственных гармонических колебаний, которые можно выделить во временных рядах, тогда задача прогноза сводилась к дальнейшей их экстраполяции на будущее. Но оказывалось, что, несмотря на видимые на графиках колебания в метеорологических рядах, точные методы статистического анализа их не обнаруживали, потому что колебания со временем медленно изменяли фазу и период. С математической точки зрения, изменения периода и фазы колебаний означает отсутствие периодических изменений в многолетних метеорологических рядах. На этом основании делались выводы о случайности, т.е. об отсутствии изменений климата. Появилось даже два термина – «изменение климата» и «изменчивость климата». Под *изменением климата* предлагалось понимать **необратимое** изменение климата в результате антропогенного усиления парникового эффекта в атмосфере [75], а все другие естественные колебания, поспешно отнесенные к **случайным**, объединили странным термином *«изменчивость климата»*.

Универсальной количественной оценкой изменения климата является величина тренда изменений, которая чаще всего характеризуется коэффициентом линейного уравнения временного ряда. А наиболее логичной количественной оценкой изменчивости случайных чисел является дисперсия временного ряда, и в этом смысле термин «изменчивость климата» был бы уместен. В классическом учебнике по климатологии [3] термин «изменчивость» употребляется для характеристики меры рассеяния значений ряда относительно среднего значения.

К сожалению, в современной научной литературе слова «изменение», «изменения» и «изменчивость» применяются как синонимы, при этом всегда подразумевается то, что следует называть изменениями. В последние годы в научной литературе слово «изменчивость» почти полностью вытеснило слово «изменение» во всех тех случаях, когда речь идет именно об изменениях климата.

Употребление слова «изменчивость» вместо слова «изменения» недопустимо по нормам русского языка. Если обратиться к исконным значениям слов «изменение» и «изменчивость» на основе словарных статей, то следует учитывать, что изменение характеризует переход климата в иное состояние за некоторое время, а изменчивость характеризует разнообразие значений температуры в некотором интервале времени. Отсюда следует, что если на рассматриваемом интервале времени наблюдается один переход климата в иное состояние, то это *изменение* климата, если таких переходов два и больше на рассматриваемом интервале, то это *колебания климата*. Колебания климата – это сменяющиеся потепления, похолодания, увлажнение и иссушение климата и т.д. Можно также говорить, что колебания – это несколько изменений на рассматриваемом интервале, т.е. изменения климата (изменение во множественном числе) в некотором смысле является синонимом колебаний климата. Но колебания климата называть изменчивостью недопустимо ни при каких условиях.

Однако все в мире относительно. В природе всегда существуют колебания разного временного масштаба. Так, например, с начала XX века обнаруживается положительный тренд глобальной температуры – это

изменение климата, а первое и второе глобальные потепления (и другие более короткопериодные переходы климата в иное состояние) – это колебания климата. Говоря об изменении климата с начала века, следует учитывать, что всегда в более длительной истории фаза потепления климата, сколь длительной бы она не была, сменялась фазой похолодания. Из этого следует, что понятия «изменение климата» и «колебания климата» являются условными, их смысл зависит от рассматриваемого интервала времени и от полноты наших знаний о природе тех или иных состояний климата. Если по прошествии лет современное глобальное потепление сменится временным похолоданием, то потомки узнают, что в XX веке люди жили в положительную фазу колебаний глобального климата. Если потепление будет продолжаться всегда, значит, в начале XX века действительно началось изменение климата, возможно, бесповоротное в обозримом будущем. Но и в этом случае не следует поспешно забывать о колебаниях климата еще большего временного масштаба. В недрах океана, в недрах Земли и в космосе существуют предпосылки для колебаний климата в масштабах нескольких столетий и тысячелетий. Поэтому всегда изменение климата на ограниченном интервале времени является лишь частным случаем более длительных колебаний климата.

Рассмотренные варианты употребления терминов «изменение климата» и «колебания климата» логичны с точки зрения физики земных процессов, управляющих климатом, с учетом понимания возможности существования закономерностей, которые еще не открыты. А в терминах «изменение климата» и «изменчивость климата» заложен оттенок предположения о том, что существует однонаправленное, только антропогенное потепление климата, а все другие состояния климата случайны и их можно объединить понятием «изменчивость климата». Но даже и в этом случае применение слова «изменчивость» противоречит нормам русского языка. А предположение о случайности является препятствием на пути дальнейших исследований и противоречит опыту, который показывает, что в природе нет ничего случайного, а все кажущееся случайным – результат недостаточности

наших знаний сегодня. Проходит время, и многое, считавшееся ранее случайным, становится понятным и закономерным.

Так сложилось, что неуместное употребление слова «изменчивость» стало применяться почти всегда, когда речь шла об изменениях климата. В тех случаях, когда действительно необходимо говорить об изменчивости, как о статистической характеристике разнообразия или разброса значений температуры в некотором интервале времени, обнаружилось, что не находится свободного подходящего слова в русском языке. Уместное для этого случая слово «изменчивость» уже занято, а другого нет. Поэтому иногда употребляют англоязычное слово «вариабельность» вместо занятого русского слова «изменчивость». Вот такая путаница: изменения климата называют изменчивостью, а изменчивость – вариабельностью.

Итак, в природе существуют колебания климата разного временного масштаба, которые можно также называть изменениями климата, и может существовать однонаправленное изменение климата, как частный случай колебаний большей длительности. В мониторинге климата допустимо употребление только этих терминов. Изменчивость – это термин только для меры разнообразия или разброса значений метеорологических характеристик.

В публикациях недавнего прошлого, говоря об изменении климата, почти всегда имели в виду антропогенную его природу и, следовательно, априори подразумевали однонаправленное потепление климата. Новые исследования и новые результаты наблюдений показывают, что в природе действительно существует антропогенная составляющая изменения климата наряду с естественными составляющими, поэтому в тех случаях, когда речь идет именно об антропогенной составляющей изменения климата, следует это особо подчеркивать. Но не следует современное потепление климата полностью относить к антропогенному изменению. Это противоречит физике атмосферы, океана и всей климатической системы, а также всей истории наблюдений и косвенных данных, показывающих, что колебания климата были всегда в прошлом и, вероятно, будут всегда в будущем. В мониторинге мы можем

фиксировать только суммарный результат естественных колебаний климата разного временного масштаба и антропогенной составляющей.

Далее *изменением климата* будем называть то, что оценивается величиной аномалии или значением тренда в различных временных масштабах, а *климатической изменчивостью* – оценки разнообразия значений температуры. Изменчивость может характеризоваться, например, дисперсией температуры на выбранном интервале времени или дисперсией отклонений от тренда температуры на том же интервале. Термины «*изменения климата*» и «*колебания климата*» можно употреблять как синонимы.

1.2. Изменения и колебания глобальной температуры

По данным инструментальных наблюдений за период более ста лет совершенно убедительно доказано наличие изменений климата во всех слоях атмосферы. Поиски причин и физических механизмов, которые уже привели к изменению климата и продолжают действовать, пока еще не дали однозначного результата. Данные измерений и их анализ показывают суммарные изменения климата атмосферы, вызванные как антропогенными факторами, прежде всего усилением концентрации парниковых газов, так и естественными факторами – долгопериодные колебательные процессы внутренней динамики климатической системы, солнечная активность, геофизические и астрономические факторы. Под внутренней динамикой климатической системы понимается прежде всего взаимодействие атмосферы с океаном, в глубинных слоях которого возможны колебания длительностью от нескольких лет до столетий и тысячелетий. Естественно, для таких колебаний в океане существуют свои как внутренние, так и внешние причины.

Потепление глобального климата, начавшееся в начале XX века (рис. 1.1) и наблюдавшееся до конца XX века, длительное время почти

безоговорочно приписывалось усилению парникового эффекта в результате антропогенных выбросов парниковых газов, прежде всего углекислого газа и метана [96], но при этом многие ученые не были так уверены в этом и продолжали исследование возможных причин современного глобального потепления.

Однако межправительственная группа экспертов по изменению климата [96] в очередной раз пришла к заключению, что потепление климатической системы является бесспорным, наблюдается увеличение глобальных средних температур воздуха и океана, происходит сокращение площади снежного и ледяного покрова, растет средний уровень Мирового океана. Отмечается, что увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере из-за деятельности человека, скорее всего, является основной причиной потепления климата с середины XX века. На фоне потепления наблюдаются колебания климата различного масштаба. Волны тепла и холода в отдельные годы являются результатом влияния Эль-Ниньо и Ла-Нинья в экваториальной части Тихого океана [94, 105].

Вопрос о причинах потепления и ответ на него играют решающее значение для человечества. Если считать, что потепление климата вызвано человеческой деятельностью, тогда и в будущем следует ожидать бесповоротного усиления потепления и неизбежной экологической катастрофы. Если современное потепление только очередная фаза роста в естественных колебаниях, тогда катастрофа не предвидится.

На рис. 1.1 показано изменение обобщенных аномалий температуры приземного воздуха над сушей и температуры поверхности океана. Видно, что после 2000 года потепление не усиливалось. Возникло много предположений об окончании потепления, после которого может наступить похолодание глобального климата. Если похолодание произойдет, это будет означать, что выводы о преимущественно антропогенной природе потепления в XX веке были преувеличены. Пока еще рано делать окончательные выводы.

С 1979 года спутники NOAA измеряют температуру нижнего слоя атмосферы. На спутниках установлены свои прецизионные

термометры, откалиброванные перед запуском. Спутниковые данные не корректируются наземными измерениями. На рис. 1.2 приведены спутниковые данные аномалий глобальной температуры нижнего слоя атмосферы.

Из рис. 1.2 видно, что самая высокая температура воздуха на планете была в 1998 году, после этого роста температуры не наблюдалось до 2009 года, а в 2010 году температура повысилась, но не достигла значений 1998 года.

За 1979–2010 гг. линейный тренд температуры составил $0,144\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (вклад 34 %).

На рис. 1.3 показано изменение аномалий среднегодовой температуры воздуха в широтной зоне $70\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{с.ш.}$ [83]. Как и в случае глобальной температуры, на рассматриваемом временном интервале наблюдается два потепления – первое в 1930–1940-х гг. и второе в конце XX века. Указанные два потепления отстоят друг от друга на 50–60 лет, что позволило авторам [83] сделать вывод о наличии 50–60-летних колебаний климата, которые не могут быть следствием антропогенной деятельности.

Наличие 50–60-летнего цикла подтверждено [83] вейвлет-спектром аномалий среднегодовой температуры воздуха. Кроме этого цикла (его вклад в общую дисперсию 39 %), в изменениях среднегодовой температуры воздуха в Арктической зоне выявлен линейный тренд (вклад в дисперсию 14 %) и 20-летний цикл (вклад в дисперсию 5 %) [17]. За это же время наблюдалось почти линейное повышение концентрации углекислого газа в атмосфере. Если повышение содержания CO_2 вносит свой вклад в повышение глобальной температуры, то с ним можно связать только трендовую составляющую. Из этого можно сделать вывод, что в высоких широтах вклад усиления парникового эффекта в прирост температуры составляет около 14 %.

В [83] выполнено сопоставление оценок линейных трендов и 60-летних колебаний в разных широтных зонах, результаты представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики изменений среднегодовой температуры воздуха
в широтных зонах Северного полушария в XX веке

Широтная зона, ° с.ш.	Средняя амплитуда 60-летнего цикла, °	Вклад линейного тренда в дисперсию, %	Вклад 60-летнего цикла тренда в дисперсию, %
70–85	0,65	13	39
40–65	0,25	17	27
17,5–87,5	0,17	59	23

Из таблицы видно, что амплитуда 60-летнего цикла температуры воздуха и его вклад в общую дисперсию заметно выше в Арктической зоне, чем в умеренных широтах и на большей части Северного полушария. А вклад линейного тренда в дисперсию среднегодовой температуры уменьшается с увеличением широты. Аналогичные выводы получены при анализе ледяного покрова.

Если потепление климата – результат усиления парникового эффекта, тогда следовало бы ожидать усиления линейного тренда в высоких широтах, но этого не наблюдается. Вместо этого в высоких широтах усиливаются колебания климата, которые никак не могут быть связаны с ростом концентрации парниковых газов.

Авторы [83] делают однозначный вывод о том, что циклические колебания состояния ледяного покрова вызываются процессами в атмосфере и океане, на которые оказывают воздействие естественные внутренние и внешние факторы.

Аналогичные результаты получены за рубежом. В [108] выполнен анализ многолетнего хода аномалий глобальной среднегодовой температуры и построен прогноз изменений аномалий до 2100 года на основе выделенных 60-летних колебаний и линейного тренда. На рис. 1.4 (взято из [108]) показано, что 60-летние колебания, наложенные на линейный тренд, хорошо описывают главные особенности колебания климата с конца XIX века до наших дней. Формула этой модели для прогноза:

$$GMTA=0,0059(Y-1880)-0,52+0,3\cos(((Y-1880)/60)*2*3,1416),$$

где Y – годы.

Локальные минимумы колебаний климата были в 1910 и 1970 гг., предполагается их повторение в 2030 и 2090 гг.; локальные максимумы – в 1880, 1940, 2000 гг., ожидается их повторение в 2060 году. Показано, что не меньше 60 % потепления климата, начиная с 1970 года, является результатом естественных циклов, которые существуют в Солнечной системе. По этой модели прогнозируется стабилизация климата или похолодание до 2030–2040-х гг. [110]. 60-летний цикл обнаруживается и в других показателях. Представленные на рис. 1.5 графики со всей очевидностью демонстрируют 60-летний цикл во всех показателях как вне атмосферы (а и б) и в атмосфере (с и d).

Изменения в геомагнитной активности, в угловой скорости вращения Земли и атмосферных показателях согласованы и происходят почти синхронно. Изменения в атмосферной циркуляции и в температуре воздуха происходят с небольшим запаздыванием по отношению к изменениям во внешних индексах.

Представленных сведений о наличии цикличности в изменениях глобального климата достаточно, чтобы не делать выводы об отсутствии естественных факторов в современных изменениях климата. Признание существенной роли естественных факторов в современных изменениях климата в корне меняет подходы к прогнозированию будущих состояний климата. Естественные изменения – это всегда колебания той или иной длительности, следовательно, после каждой фазы потепления неизбежно наступит фаза временного похолодания. Недостаточность наших знаний – не повод для отрицания роли естественных факторов в пользу антропогенного фактора в современном потеплении климата. В последующих главах будет показано, что в части доказанности преобладающей роли парниковых газов в потеплении климата существует много проблем и заблуждений.

16–19 ноября 2010 года в Киеве состоялась Международная конференция «Глобальные и региональные изменения климата». Участники конференции в итогах конференции сделали выводы, которые значительно отличаются от заключения Международной группы экспертов [96]. В материалах конференции отмечается, что современная

климатическая эпоха характеризуется дополнительным интенсивным антропогенным воздействием, т.е. антропогенная составляющая в потеплении климата рассматривается как один из дополнительных факторов изменений климата, в отличие заявления ИРСС о том, что антропогенный углекислый газ является главным виновником потепления климата второй половины XX века.

Конференция отметила, что наблюдается 50–70-летняя цикличность в скорости изменения глобальной приземной температуры, обусловленная естественными процессами в климатической системе атмосфера–океан (крупномасштабные атмосферные циркуляции, Североатлантическая осцилляция). На фоне регулярных климатических изменений отмечены межгодовые и десятилетние квазипериодические колебания основных гидрометеорологических параметров, обусловленные естественными процессами, протекающими в климатической системе. В заявлении ИРСС цикличность не упоминается, а межгодовые колебания климата рассматриваются в качестве шума, который не может быть причиной современного роста глобальной температуры.

Еще более разительный вывод участников киевской конференции касается климата последнего десятилетия. В решении конференции зафиксировано, что в последнее десятилетие наметилась тенденция снижения скорости роста глобальной температуры как в Северном, так и в Южном полушариях, что может быть следствием взаимной компенсации парникового эффекта и снижения температуры, вызванного естественными геофизическими процессами. Конференция признала неопределенность, а по сути – недоказанность существенного антропогенного влияния на климат. Названы первоочередные задачи в проблеме современных изменений климата: активизировать исследования, способные уменьшить степень научной неопределенности влияния аэрозолей естественного и антропогенного происхождения, а также внешних факторов – солнечной и геомагнитной активности, гравитационного и магнитного полей и т.д.

1.3. Пространственные особенности изменения температуры (тренды) за 1976–2010 гг.

Изменения климата в разных масштабах времени имеют очень сложный характер и описываются различными методами. Рассмотрим только долговременные изменения температуры, для которых наиболее универсальной оценкой является оценка трендовой составляющей. В настоящем разделе показаны результаты автора в исследовании пространственных особенностей изменений климата на Земле.

Исходные данные для анализа

Исследования выполнены на основе рядов среднемесячных значений температуры по 6036 станциям мира, из них 1401 станция – на территории России. По зарубежным станциям данные получены из NCDC (данные Global Historical Climatology Network-Monthly Dataset <https://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v3.php>). Настоящая третья версия данных NCDC (GHCN-M version 3) появилась в мае 2011 года и ежемесячно пополняется данными новых наблюдений. Версия 3 отличается от версии 2 более надежным контролем данных и проведенной гомогенизацией – исследование однородности временных рядов. В результате некоторые ряды откорректированы, часть станций, которые ранее были в версии 2 этого массива, исключены из версии 3, как неоднородные или ненадежные данные.

Ряды исходных данных GHCN-M version 3 имеют пропуски, часть из них удалось заполнить из другого источника (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gsod> Federal climate complex global surface summary of day data version 7, over 9000 world wide statons) на основе вычисленных среднемесячных значений температуры по данным массива суточных данных. Оказалось, что пропуски в данных в разных исходных массивах не всегда совпадают, поэтому совмещение данных соответственных станций позволило улучшить объединенный массив данных.

Данные по европейским станциям дополнены данными Европейского проекта (European Climate Assessment & Dataset <http://eca.knmi.nl/>), которые выгодно отличаются полнотой и качеством.

По российским станциям использовались данные, подготовленные автором на базе фондов ВНИИГМИ-МЦД.

Таким образом, собраны все доступные данные по миру за историю наблюдений, впервые в общий массив включены практически все действующие метеорологические станции России. Это позволило обнаружить не известные ранее пространственные особенности современных изменений климата. Наименее охваченными данными оказались северо-западные регионы Канады. На некоторых картах, представленных далее, эти районы отмечены белыми пятнами.

Вычислялись значения линейных трендов среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха за 1976–2010 гг., их значения выражены в градусах на 10 лет ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Важное значение для вычисления трендов имеет выбор начального года. Глобальное потепление началось в начале XX века, но в середине XX столетия наблюдалось временное похолодание, которое с середины 1970-х гг. сменилось потеплением. Таким образом, последующий анализ пространственных особенностей охватывает период с начала второго интенсивного глобального потепления.

Ранее в авторской монографии [88] подобный анализ проводился для 1974–2005 гг.

Тренды среднегодовой температуры воздуха

На рис. 1.6 приведена глобальная карта трендов среднегодовой температуры воздуха над континентами за 1976–2010 гг. Значения представлены на картах в $^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Карта показывает, что на Земле преобладают положительные тренды среднегодовой температуры воздуха.

В Северной Америке рост температуры более $0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдался в восточной части, от Великих озер до Гренландии, охватывая самые низкие над уровнем моря регионы (с высотой над уровнем моря не более 500 м), а также в долинах рек Миссисипи, Рио-Гранде и Колорадо. Наибольшие положительные тренды (больше $0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет) наблюдались в низинных районах, вблизи северной части Гудзонова залива, окруженных возвышенностями. В Гренландии тренды составили

преимущественно от 0,3 до 0,6 °C/10 лет. Во всех случаях границы районов с трендами выбранной градации хорошо согласуются с характерными особенностями рельефа в этих местах. Положительные тренды среднегодовой температуры в Северной Америке усиливаются в районах, где возвышенности являются естественным препятствием на пути крупномасштабных перемещений воздушных масс. Аналогичный эффект был ранее показан [76] в горных районах Алтая и Саян, где в замкнутых формах рельефа обнаружена величина тренда температуры в 2–3 раза большая, чем над равнинами.

В Южной Америке тренды от 0,3 до 0,6 °C/10 лет наблюдаются в бассейне Амазонки. На картах трендов за 1974–2005 гг., которые были опубликованы в [88], в этом районе тренды были слабее.

В Африке пространственные особенности трендов выражены слабо. В Европе очаги наиболее сильных положительных трендов со значениями больше 0,6 °C/10 лет находятся на севере Пиренейского полуострова, на юго-западе Скандинавии, на окруженной горами территории около северной части Балтийского моря, а также в долине Днепра и на Среднерусской возвышенности. На остальной части Европы тренды составляют преимущественно от 0,3 до 0,6 °C/10 лет. Уральские горы являются естественной границей для воздушных потоков с запада и они же являются границей между территорией с трендами 0,3–0,6 °C/10 лет и территорией со слабыми трендами в Западной Сибири.

Во всех случаях горные хребты северо-южной ориентации и возвышенности способствуют повышению положительных трендов температуры воздуха на их западной части и понижению за хребтом на их восточной части.

В Азии вся Восточная Сибирь, Дальний Восток и районы севернее высочайших горных массивов мира имеют значения трендов 0,3–0,6 °C/10 лет. А в бассейнах Индигирки и Колымы тренды больше 0,6 °C/10 лет. Это низинные районы вблизи океана, отделенные от остальной части материка возвышенностями и горными хребтами.

Аналогично в низинных районах на севере полуострова Индостан тренды больше 0,6 °C/10 лет. Зависимость трендов от рельефа

очевидна, величина тренда растет в местах, в которых воздушные массы с океана встречаются с препятствиями в виде горных хребтов на суше.

В Австралии тренды среднегодовой температуры положительные, но не превышают $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

Сравнивая региональные особенности изменений среднегодовой температуры за 1976–2010 гг. с аналогичными оценками за 1974–2005 гг., опубликованные в [88], обнаружено, что районы наибольших положительных трендов несколько сместились, но закономерности остались прежними. Новые результаты вновь подтвердили, что в формировании регионального климата заметную роль играет перенос воздушных масс с океана на континент и взаимодействие воздушных масс с подстилающей поверхностью – рельефом. Так как рельеф не изменялся за рассмотренные десятилетия, то, следовательно, изменения регионального климата в период интенсивного глобального потепления в заметной степени связаны с изменениями за эти годы траекторий атмосферной циркуляции или температурно-влажностного состояния переносимых воздушных масс, которые являются неотъемлемой частью глобальных изменений климата.

Существенные различия в пространственных особенностях изменений климата обнаруживаются по сезонам и даже по месяцам.

Тренды температуры воздуха зимой

Тренды зимой (рис. 1.7 – 1.9) имеют значения, значительно превышающие тренды среднегодовых значений, и яркие региональные особенности. Рассматривая тренды по сезонам, будем использовать наименования сезонов, относящиеся к Северному полушарию.

В декабре (рис. 1.7) наибольшее потепление за рассматриваемые годы произошло в северной половине Северной Америки. Оно охватило все низинные регионы на континенте восточнее Скалистых гор от северных границ до Великих озер, а также на побережье вблизи Барроу, в долине рек Юкон и Маккензи и на Аляске. Значения трендов в этих районах больше $0,6$ и даже больше $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

В Южной Америке положительные тренды в декабре наблюдаются на территории в нижней части бассейна Амазонки, значения не превышают $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

В Евразии наибольшие тренды в декабре наблюдаются на Скандинавии ($> 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и чуть слабее тренды охватывают почти всю Европу.

Другими обширными районами положительных трендов температуры в декабре являются низинные области в Восточной Сибири в долине реки Колыма и в других низинных районах до восточного окончания континента.

В Африке положительные тренды температуры $> 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ наблюдаются вблизи Эфиопского нагорья, а тренды $> 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ охватывают всю северную половину Африки.

Примечательной является обширная область с отрицательными трендами температуры $-0,6$ и $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, охватывающая континентальные части долин всех трех великих сибирских рек.

В январе (рис. 1.8) происходит смещение областей с положительными и отрицательными трендами температуры. В Северной Америке положительные тренды из северных районов смещаются к югу и охватывают почти весь континент, за исключением Аляски и северной островной части Канады, где наблюдается понижение температуры с трендами $-0,6$ и $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. В Европе и Африке мало что изменилось, а в Азии в дальнем северо-восточном регионе наблюдаются отрицательные тренды. В низинной области севернее и восточнее Среднесибирского плоскогорья и в долинах рек Амур и Лена наблюдаются положительные тренды. Неожиданными являются положительные тренды в районе высочайших гор Тибета. Область отрицательных трендов Сибири сохранилась только между Обью и Енисеем.

В Австралии положительные тренды температуры больше $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ охватывают низинную территорию в южной половине.

В феврале (рис. 1.9) потепление больше чем на $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ произошло на Аляске, в западной части Гренландии, на северо-востоке Южной Америки, в Центральной Африке и на огромной

территории Евразии, за исключением всего северо-востока за Енисеем и севера европейской части России.

Следует заметить, что зимой на всей Земле преобладают положительные тренды. Наибольшие как положительные $> 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$, так в некоторых регионах и отрицательные тренды $< -0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$, наблюдаются в высоких широтах Северного полушария.

Зимой, так же как и за год в целом, главной особенностью пространственного распределения трендов по интенсивности является зависимость от рельефа местности. Но влияние рельефа на величину и знак тренда температуры неоднозначно проявляется на различных географических широтах.

Сравнивая эти результаты с выводами других авторов, необходимо обязательно учитывать период лет, за который выделялись тренды. Это имеет не только статистическое, но принципиальное физическое значение. В разные эпохи тренды могут иметь разное происхождение и, как следствие, разную интенсивность, знак и локализацию.

Тренды температуры воздуха весной

Весной (рис. 1.10 – 1.12) также преобладают положительные тренды. В марте (рис. 1.10) наибольшей интенсивностью $> 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ и $> 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ отличается Евразийский континент. На всей территории наблюдается интенсивное потепление. Тренды $> 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ охватывают также небольшие районы на севере Африки, на востоке Гренландии и на юго-западе Северной Америки.

В апреле (рис. 1.11) и мае (рис. 1.12) обширная область положительных трендов расширяется, ослабевают по интенсивности трендов и разделяется на отдельные части, при этом охватывая все Восточное полушарие (его северную и южную части). В это же время в Северной и Южной Америке появляются очаги отрицательных трендов $< -0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$.

Тренды температуры воздуха летом

Летом (рис. 1.13 – 1.15) на всей Земле преобладают положительные тренды температуры. По разным месяцам различия в

пространственных особенностях трендов невелики. Наибольшие положительные тренды $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ наблюдаются на севере Северной Америки (июль–август, рис. 1.14, 1.15), на Европейской территории и прилегающей части севера Африки (июнь–август, рис. 1.13, 1.14), на северо-востоке Евразии (июнь–август, рис. 1.13, 1.14).

Тренды температуры воздуха осенью

Осенью в сентябре (рис. 1.16) начинается перестройка пространственного распределения трендов вместе с известной перестройкой общей циркуляции атмосферы с летнего типа на зимний. Начиная с октября (рис. 1.17) нарастает интенсивность трендов температуры в высоких широтах Северного полушария ($> 60\text{ }^{\circ}\text{с.ш.}$). Трендами $> 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ и $> 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ охвачен север Северной Америки и север Евразии. Тренды $> 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ охватывают восточные части Северной и Южной Америки, Африку и восточную часть Австралии. В ноябре (рис. 1.18) тренды со значениями $> 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ смещаются примерно до $40\text{ }^{\circ}\text{с.ш.}$ в Северной Америке и Евразии, при этом на севере Сибири появляется протяженная область с отрицательными трендами температуры ($< -0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ и $< -0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). Позднее, в декабре, как уже было описано, эта область разрастется и охватит всю Сибирь.

Итак, глобальное потепление сопровождается неоднозначными изменениями регионального климата и сезонными особенностями. На континентах Земли преобладают положительные тренды температуры воздуха во все месяцы года, но выделяются также районы заметных отрицательных трендов. Наибольшие положительные тренды наблюдаются в холодное полугодие в высоких широтах Северного полушария, однако в отдельные месяцы на тех же широтах появляются области интенсивного понижения температуры.

Границы областей с трендами разного знака или разной интенсивности часто проходят по линиям изменения рельефа. Характер сезонных и региональных различий влияния рельефа на изменения климата согласуется с известными представлениями об атмосферной циркуляции как одним из факторов формирования климата.

Существенные различия в пространственных особенностях изменений климата по сезонам и даже по месяцам являются следствием особенностей сезонных перестроек атмосферной циркуляции и изменения эффективности воздействия факторов изменений климата.

1.4. Изменения изменчивости температуры

По данным [96], современное глобальное потепление сопровождается усилением изменчивости и экстремальности климата на Земле. Между тем необходимо различать изменчивость климата в пространстве и во времени с учетом сезонов года.

Изменчивость климата во времени – сравнение по двум отрезкам времени

Оценки временной климатической изменчивости вычислены по двум 30-летним интервалам лет: 1945–1974 и 1975–2004 гг. по станциям Северного полушария Земли. Для подробного анализа столь длительного интервала лет достаточное количество станций имеется только по Северному полушарию.

Первый интервал лет охватывает годы временного небольшого похолодания глобального климата с относительно низкими значениями температуры, а второй – годы наиболее интенсивного потепления климата и высоких значений температуры воздуха. По каждому интервалу выделен линейный тренд температуры и получены отклонения от него на каждый год, как разность между исходными и трендовыми значениями. По значениям отклонений (остатков после исключения трендов) на каждом интервале лет отдельно вычислены среднеквадратические отклонения σ_1 за 1945–1974 гг. и σ_2 за 1975–2004 гг. Разность между ними $\delta = \sigma_2 - \sigma_1$ по каждой станции Северного полушария наносилась на карту. Значения δ являются показателями изменчивости климата, их увеличение означает усиление межгодовой изменчивости температуры в последнем тридцатилетии, по сравнению

с предшествующим. На рис. 1.19 и 1.20 показаны карты пространственного распределения временной изменчивости температуры по месяцам.

Усиление изменчивости наиболее ощутимо влияет на человека и его хозяйственную деятельность, так как рост межгодовой изменчивости сопровождается ростом экстремальности климата.

Карты (рис. 1.19 и 1.20) показывают, что рост изменчивости климата происходит только в ограниченных регионах полушария.

Так, в декабре наибольший рост изменчивости наблюдается на севере США, на юго-востоке Канады, на Дальнем Востоке, в Восточной Сибири и Поволжье.

На значительно большей оставшейся части территории полушария изменчивость мало изменилась или уменьшилась. В другие месяцы соотношение площадей, занятых усилением изменчивости, и площадей, занятых ее ослаблением, всегда характеризует преобладание площади территории с ослаблением изменчивости. Для краткости далее будет указано местоположение только областей усиления изменчивости.

В январе изменчивость климата усилилась на северо-западе Канады, на территории всей зарубежной Европы и на севере Европейской территории России и Восточной Сибири, а также на территории Восточной Сибири.

В феврале наибольший рост изменчивости наблюдается на территории США, включая Аляску, в Канаде, на Дальнем Востоке и в России в районе северных европейских морей.

В марте усиление изменчивости произошло преимущественно на территории России. На карте полоса увеличения изменчивости охватывает юг ЕТР, Восточной и Западной Сибири и весь Дальний Восток.

В интервале с апреля по октябрь только в июне произошло заметное усиление изменчивости. Область усиления изменчивости в июне почти вся находится на территории России.

В ноябре наибольший рост изменчивости наблюдался на территории США, частично – в Канаде, на Дальнем Востоке, в Восточной Сибири и в зарубежной Европе.

На остальных территориях во всех месяцах года произошло уменьшение изменчивости.

В целом на полушарии по всем месяцам года рост изменчивости наблюдается на ограниченных территориях преимущественно в средних и высоких широтах, а в низких широтах чаще наблюдается ослабление межгодовой изменчивости.

Сравнение карт разных месяцев показывает, что усиление изменчивости произошло на ограниченных территориях в холодные месяцы года с ноября по февраль и в переходный месяц между холодным и теплым полугодиями – июнь.

Изменчивость климата во времени – оценки по многолетним трендам в экстремумах разного знака

При анализе по более коротким рядам, например по таким, которые имеются по станциям Южного полушария, нет возможности для сравнения дисперсий остатков по двум выборкам. Для коротких рядов можно применить другой метод, который оценивает изменение во времени амплитуды межгодовой изменчивости климата за последние 30 лет.

Увеличение изменчивости во времени проявляется в увеличении экстремумов разного знака в отклонениях от тренда. Если по каждой станции анализировать отдельно ряды, составленные из положительных и отрицательных отклонений, и по каждому из них отдельно вычислять тренды, то при усилении изменчивости должно обнаружиться увеличение по модулю значений трендов в положительных и отрицательных отклонениях. Такой метод позволяет получить оценки изменчивости климата во времени за последние 30 лет и глобальные карты межгодовой изменчивости этого интервала лет.

В качестве рядов использовались наблюдаемые на станциях погоди́чные среднемесячные значения температуры воздуха одноименных месяцев. Анализ проводился отдельно по месяцам. Для каждой станции по каждому ряду вначале вычислялось уравнение линейного тренда и трендовые значения ряда по этому уравнению на каждый год. Погоди́чные разности между значениями исходного ряда и трендовыми значениями в соответственные годы дали погоди́чные значения

отклонений температуры от тренда. На основе данных одноименных месяцев по каждой станции выборка лет с положительными отклонениями составила ряд положительных отклонений (p) температуры заданного месяца, а выборка лет с отрицательными отклонениями составила ряд отрицательных отклонений (n) температуры заданного месяца. По каждому из двух составленных рядов также вычислялись уравнения трендов, одно из которых описывало тенденцию многолетнего изменения положительных отклонений t_p , а другое – тенденцию многолетнего изменения отрицательных отклонений t_n температуры от тренда исходного ряда.

Ранее вычисленный тренд исходного ряда характеризовал тенденцию многолетних изменений температуры, а новые тренды отклонений характеризуют тенденцию роста или ослабления величины отклонений, т.е. рост или ослабление изменчивости. Увеличение со временем положительных отклонений ряда и (или) модуля отрицательных отклонений означает увеличение изменчивости климата.

Уравнение тренда положительных отклонений запишем

$$t_p(i) = a_p(i) + b_p,$$

а уравнение тренда отрицательных отклонений

$$t_n(j) = a_n(j) + b_n.$$

Различия (разность) в этих трендах характеризуют тенденцию изменчивости ряда t_i . За количество лет, равное f , тренд изменчивости составит $t_i = (a_p - a_n) \cdot f$.

Достоверность тренда изменчивости a_i , вычисленного таким образом, оценивалась с учетом дисперсий D_p и D_n рядов отклонений. За достоверные принимались такие тренды изменчивости, величина квадрата которых была больше суммы дисперсий рядов исходных положительных (p) и отрицательных (n) отклонений:

$$(t_i)^2 > (D_p + D_n).$$

Отсюда условием достоверности трендов изменчивости является

$$\left| a_p - a_n \right| > \frac{\sqrt{(D_p + D_n)}}{f}.$$

Расчеты оценок изменения межгодовой изменчивости по описанному методу выполнены по 11 187 станциям Земли за 1974–2005 гг. Результаты представлены по выборочным месяцам на рис. 1.21, 1.23–1.29. Положительные значения оценок показывают увеличение амплитуды межгодовых отклонений температуры от тренда изменений климата, т.е. увеличение изменчивости климата во времени.

В январе (рис. 1.21) изменчивость климата усилилась на северо-западе Канады, на севере Европы, на юге Восточной Сибири и частично на Дальнем Востоке, а также на территории Турции, на северо-западе Африки и в восточной части Австралии. В других регионах Земли временная изменчивость не увеличилась или уменьшилась. На рис. 1.22 приведены географические точки, в которых оценки временной изменчивости статистически достоверны с вероятностью более 95 %. Значимые точки охватывают все регионы мира.

По другим месяцам далее все выводы будут основаны на статистически достоверных оценках, а карты расположения станций с достоверными оценками приводиться не будут.

Временная изменчивость в феврале (рис. 1.23) во многих регионах мира заметно отличалась от январской.

Большой рост изменчивости наблюдался во многих регионах Восточного полушария. К районам усиления изменчивости относится вся Евразия севернее 55 °с.ш., большая часть Африки и юго-восточная половина Австралии. В Западном полушарии усиление изменчивости наблюдалось частично на западе США, на востоке Канады и юге Южной Америки. А самые заметные уменьшения изменчивости наблюдались на севере и северо-западе Северной Америки.

В марте (рис. 1.24) усиление изменчивости произошло преимущественно на территории азиатской части России и на прилегающих с юга территориях, а также в США и Канаде в низинных районах, прилегающих к Скалистым горам с востока.

В интервале с апреля по октябрь только в июне и июле (рис. 1.25 и 1.26) произошло усиление изменчивости. Области усиления изменчивости климата в июне занимают огромные территории в

России, Казахстане, Индии и Египте, а также в центре Северной Америки. В июле области усиления изменчивости климата смещаются, но их распределение по континентам и общая их площадь остается примерно такой же, как в июне.

В октябре и ноябре (рис. 1.27 и 1.28) усиление изменчивости климата охватывает сначала Западную Европу, а затем и всю Европу. В Северной Америке усиление изменчивости в октябре-ноябре наблюдалось сначала на Аляске и восточнее Скалистых гор, а затем перешло на район Великих озер, а также охватило всю территорию США.

В декабре (рис. 1.29) на территории Северной Америки области усиления изменчивости повторяют расположение мартовского пространственного распределения. А в Евразии в декабре область усиления изменчивости проходит полосой от Восточной Европы до Дальнего Востока, за исключением некоторых северных регионов и района, прилегающего к Охотскому морю с северо-запада.

Полученные результаты отражают изменение изменчивости только за последние три десятилетия, в отличие от результатов, которые показывали изменение изменчивости за два соседних тридцатилетия. Поэтому они не совсем совпадают.

Пространственная изменчивость климата на Земле

Изменения климата происходят неравномерно в различных регионах Земли, поэтому в пределах некоторой территории пространственные различия климата могут усиливаться или ослабляться. С практической точки зрения негативным последствием таких изменений является переход к не свойственному для каждой территории климату.

В настоящей работе оценкой пространственной изменчивости климата является пространственное среднеквадратическое отклонение поля среднемесячной температуры воздуха ограниченного региона на каждый заданный год. А последовательность полученных по годам значений пространственных среднеквадратических отклонений температуры используется для анализа трендов многолетних изменений пространственной изменчивости климата региона, т.е. пространственной изменчивости.

Для анализа в качестве регионов выбраны скользящие 30-градусные квадраты географической сетки Земли. Квадраты задавались скользящим образом через 5 градусов широты и долготы. В каждом таком квадрате вычислялась оценка многолетнего тренда пространственной изменчивости климата.

На рис. 1.30 – 1.33 показаны глобальные карты линейных трендов пространственной изменчивости (среднеквадратического отклонения) среднемесячной температуры, полученные по квадратам географической сетки $30 \times 30^\circ$ за 1976–2005 гг. За указанные годы имеется достаточное количество станций по всем регионам, чтобы построить карты по всей Земле, включая Южное полушарие.

На карты выводились значения трендов пространственных среднеквадратических отклонений температуры (в $^\circ\text{C}/10$ лет) для центральных месяцев сезонов. Так же, как и при анализе изменчивости во времени, карты (рис. 1.30 – 1.33) пространственной изменчивости показывают, что, несмотря на устойчивое сложившееся представление о росте изменчивости и экстремальности климата на Земле, это справедливо не для любой территории Земли и изменяется по сезонам.

В январе (рис. 1.30) рост пространственной изменчивости имеет заметную широтную зональность. Рост изменчивости наблюдается на широтах от $50\text{--}60^\circ\text{с.ш.}$ до северной границы континентов Северной Америки и Евразии на всех географических долготах и составляет преимущественно $0,5^\circ\text{C}/10$ лет. Южнее этой зоны до широт $20\text{--}30^\circ\text{с.ш.}$ – зона отрицательных трендов пространственной изменчивости температуры. Некоторое нарушение зональности заметно в краю высочайших гор Азии. Южнее $15\text{--}20^\circ\text{с.ш.}$ – зона положительных трендов пространственной изменчивости температуры, которая переходит в Южное полушарие и охватывает все южные континенты, за исключением южной части Южной Америки. В указанных экваториальных и субэкваториальных широтах наибольший на планете рост пространственной изменчивости январской температуры, тренд изменчивости составляет от $0,5$ до $1,5^\circ\text{C}/10$ лет.

На рис. 1.30 видно, что почти на всей территории России тренд пространственной изменчивости положительный. Рост изменчивости

регионального климата всегда сопровождается негативными последствиями в регионах, в данном случае таким регионом оказывается Россия по январским оценкам.

На карте Земли в апреле (рис. 1.31), по сравнению с январем, области отрицательных и положительных трендов изменчивости почти повсеместно смещаются к северу, а зональность их распределения на Земле прослеживается слабее. В результате в Северной Америке положительные тренды высоких широт замещаются отрицательными трендами около $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а в среднеширотной зоне отрицательные тренды изменчивости ослабевают. В Южной Америке в южной ее части расширяется область отрицательных трендов изменчивости. В Евразии в высоких широтах положительные тренды изменчивости сохраняются в ослабленном виде только на севере Восточной Сибири. А область положительных трендов субэкваториальных широт января расширяется в апреле, так что рост изменчивости охватывает всю Африку, Аравийский полуостров, Иранское нагорье и почти всю Западную Европу. В Австралии и Океании в апреле, так же как и в январе, изменчивость климата возрастает до $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

В России тренды изменчивости температуры в апреле слабее, чем в январе.

В июле (рис. 1.32) зональность распределения трендов пространственной изменчивости климата не просматривается на карте Земли.

Можно условно выделить в Восточном полушарии полосу положительных трендов пространственной изменчивости климата с наклонной центральной осью, проходящей в направлении Пиренейский полуостров – Австралия. Положительные тренды изменчивости охватывают всю Европу, Африку, Ближний Восток, Австралию и Океанию. В остальной части Азии преобладают отрицательные тренды изменчивости климата, за исключением прибрежных районов северных морей России и Дальнего Востока. Там слабые положительные тренды пространственной изменчивости температуры.

В октябре (рис. 1.33) пространственное распределение трендов пространственной изменчивости климата на Земле сходно с

аналогичным распределением в апреле. В октябре наибольший рост изменчивости наблюдается в поясе от северных до южных субтропиков. В средних и высоких широтах Северного полушария преобладает ослабление пространственной изменчивости климата, за небольшим исключением. В России в этом месяце слабое усиление изменчивости климата наблюдается только на севере Восточной Сибири, на всей остальной части России изменчивость климата в октябре понижается.

Представленное распределение трендов пространственной изменчивости климата в разных сезонах года показывает, что глобальное потепление приводит к локальным изменениям в структуре климата.

Эти структурные перестройки могут быть следствием изменения интенсивности взаимодействия отдельных элементов климатической системы и сезонных особенностей атмосферной циркуляции, накладывающихся на рельеф.

***Обобщенные сведения о пространственной изменчивости
среднемесячной температуры воздуха над Северным полушарием
(0–74 °с.ш.)***

Для выделения главных сезонных особенностей в трендах пространственной изменчивости климата географические различия исключались путем обобщенного анализа по всему Северному полушарию Земли.

По месяцам отдельно вычислены на каждый год пространственные дисперсии среднемесячной температуры воздуха над континентами Северного полушария по данным в узлах географической сетки $2 \times 2^\circ$.

Тренды среднеквадратических отклонений за 1950–2005 гг. показаны на рис. 1.34 для центральных месяцев сезонов.

В целом на полушарии после 1975 года при наиболее интенсивном глобальном потеплении пространственная дисперсия сильно возросла в летние месяцы (почти в два раза) и уменьшилась в остальные месяцы года. В январе отрицательный тренд составил около 4°C за 1950–2005 гг., в переходные сезоны – около 1°C , а в июле тренд положительный – около 5°C за 56 лет. Во всех случаях тренды достоверны

на уровне 95 %. Доля объясненной вариации тренда составила в январе 73 %, в апреле – 74 %, в июле – 96 %, в октябре – 68 %.

Известно, что наибольшая интенсивность потепления климата наблюдается в зимний сезон, но, как показано выше, интенсивность увеличения пространственной изменчивости в среднем на всем Северном полушарии возрастает летом и ослабевает зимой.

Результаты настоящего раздела показывают, что сложившееся в литературе представление о повсеместном росте изменчивости и экстремальности климата в эпоху современного потепления не совсем верно. Тренды изменчивости климата имеют значительные сезонные и региональные различия и не всегда положительные.

Далее рассматриваются соотношения изменений и изменчивости климата.

Соотношение изменений климата и пространственной изменчивости

Визуальное сравнение полей трендов изменений климата и полей пространственной изменчивости подсказали наличие между указанными характеристиками некоторой зависимости. В связи с этим выполнен совместный анализ изменений и изменчивости климата по данным в узлах географической сетки $2 \times 2^\circ$. Поля, в узлах которых зависимость положительная (изменчивость возрастает вместе с потеплением и уменьшается вместе с похолоданием), выделены на картах рис. 1.35–1.38 красным и синим цветом соответственно, а поля, в узлах которых зависимость отрицательная (изменчивость возрастает при потеплении и уменьшается при похолодании), показаны зеленым цветом. В январе (рис. 1.35) на карте Земли преобладает зеленый цвет – отрицательное соотношение между изменениями и изменчивостью климата преобладает на Земле, за исключением Европейской территории России, Сибири и северных районов Канады и Аляски, а также района высочайших гор Азии. В этих районах соотношение положительное (изменчивость возрастает с потеплением климата).

В январе в высоких широтах Северной Америки и Евразии севернее $55\text{--}60^\circ\text{с.ш.}$ произошло усиление изменчивости и потепление

климата. Во всех других центральных месяцах сезонов (рис. 1.36–1.38) на картах преобладает зеленый цвет, показывающий, что в большинстве регионов Земли изменения и изменчивость климата имеют разнонаправленные многолетние тенденции. Другие соотношения изменений и изменчивости встречаются реже.

В апреле (рис. 1.36) области ослабления изменчивости климата в Азии занимают протяженную полосу вблизи параллели 30 °с.ш. В других частях света в апреле зональность соотношений не просматривается.

В июле (рис. 1.37) более одной трети территории всех континентов можно отнести к районам с положительной зависимостью изменений и изменчивости климата. Зональность расположения этих районов отсутствует.

Зональность климатических особенностей всегда связана с законами поступления солнечной радиации, а нарушение зональности – с меридиональными процессами в атмосферной циркуляции и с крупномасштабными особенностями рельефа.

Карта октября (рис. 1.38) похожа на апрельскую – преобладает отрицательное соотношение между изменениями и изменчивостью климата, зональность слабо выражена.

Итак, тренды изменений регионального климата и тренды изменчивости климата при обобщении по всей Земле или по полушарию имеют, как правило, противоположные знаки во все сезоны года. Сложившееся в публикациях представление о повсеместном росте изменчивости климата нуждается в региональных и сезонных уточнениях.

Зимой (отчетливо) и в переходные сезоны (слабо) проявляется зональность сохранения знака соотношений трендов изменений и изменчивости климата.

Летом реже сохраняется правило противоположных знаков в трендах изменений и изменчивости климата и не просматривается зональность в закономерностях.

1.5. Главные вопросы об изменении климата

Изменения в общей циркуляции атмосферы часто рассматриваются как фактор климата. Региональные изменения температуры всегда связаны с изменениями атмосферной циркуляции. Термодинамические процессы в атмосфере описывают все разнообразие и взаимодействия в атмосфере, которые проявляются в изменениях измеряемых метеорологических величин (метеорологических элементов). Атмосферная циркуляция не только перераспределяет тепло по планете, но и создает такие новые условия в глобальной атмосфере, которые сопровождаются колебаниями глобального климата. Изменения в атмосферной циркуляции могут быть длительными – климатического масштаба, поэтому атмосферная циркуляция может рассматриваться как фактор климата. Возникает вопрос: «Почему изменяется атмосферная циркуляция?»

В атмосферной циркуляции могут быть как естественные собственные колебания, так и изменения или колебания под влиянием внешних факторов.

Наблюдаемые современные изменения климата хорошо согласуются с перестройками в общей циркуляции атмосферы.

В [38] приводится обширный материал о связи современного потепления с изменениями в атмосферной циркуляции. В работе показано, что изменения среднегодовой глобальной температуры воздуха в XX – начале XXI вв. находятся в противофазе с изменениями суммарной годовой продолжительности блокирующих процессов (коэффициент корреляции $K = -0,67$) и в фазе с продолжительностью циркуляции определенного типа на полюсах ($K = 0,86$). Первое и второе глобальные потепления имели разную циркуляционную основу. Далее приведем сведения из [38].

Потепление 30-х гг. XX века, вошедшее в историю как «потепление Арктики», было связано с увеличением продолжительности зональной циркуляции. Увеличение суммарной продолжительности перемещения атлантических циклонов вдоль побережья Евразии способствовало

повышению температуры воздуха на прибрежных метеорологических станциях в Арктическом бассейне и в умеренных широтах. Наибольшая продолжительность зональной циркуляции отмечалась в десятилетие 1931–1940 гг. Это годы первого глобального потепления.

Второе глобальное потепление, по данным [38], носит другой характер. Оно хорошо согласуется с ростом продолжительности группы циркуляции с циклонами на полюсах. При этих макропроцессах в Северном и Южном полушариях происходят выходы циклонов из низких широт в высокие, что сопровождается повышением температуры в средних и высоких широтах. Коэффициент корреляции среднегодовой глобальной температуры воздуха с суммарной годовой продолжительностью этой группы циркуляции за период максимального роста обеих величин (1976–2000 гг.) составляет 0,88, при этом отмечается отрицательная корреляция не только с продолжительностью циркуляции с блокирующими процессами ($K = -0,57$), но и в еще большей степени с продолжительностью зональной циркуляции ($K = -0,96$).

Первое потепление было зональным и максимально проявилось в высоких широтах. Второе потепление оказалось «пятнистым». Оно достигло максимума в 1998 году. И началось похолодание после того, как в 1997 году достигла максимума продолжительность группы циркуляции с циклонами на полюсах.

Что будет дальше? В настоящее время происходит понижение температуры поверхности океана [10] и наблюдается рост продолжительности блокирующих процессов [38], поэтому, по мнению [38], можно ожидать дальнейшего понижения глобальной среднегодовой температуры воздуха.

Итак, «пятнистое» по планете изменение температуры воздуха является следствием перестроек в общей циркуляции атмосферы, предстоит исследовать причины таких перестроек. Возмущения в атмосферной циркуляции сами по себе не возникают, на все есть причины. Поэтому нельзя обнаруженную тесную зависимость состояния климата от типов циркуляции атмосферы считать доказательством отсутствия внешнего влияния на климатическую систему. Изменения типов

циркуляции могут быть результатом вынужденных или собственных колебаний в климатической системе под влиянием внешних вынуждающих колебаний или эпизодических внешних воздействий.

При анализе факторов колебаний климата важно учитывать возможные различия вынужденных и вынуждающих их колебаний.

Давно установлено, что длительные процессы в атмосфере формируются под действием внешних по отношению к атмосфере источников энергии [47, 54, 56, 63].

Длительные внешние процессы в каждой своей фазе запускают в атмосфере короткопериодные колебания на ее собственных частотах [88], т.е. длительные внешние процессы распределяют в атмосфере потенциальную энергию и определяют начальные условия для короткопериодных процессов в атмосфере. Из этого следует два важных вывода: 1) вопрос об изменении климата сводится к вопросу о внешних факторах; 2) изменение климата необходимо фиксировать и исследовать как по изменению начальных условий, так и по изменению характеристик собственных частот атмосферы. Эти выводы определяют два главных направления в исследованиях климата. В каждом направлении исследований единственным источником информации являются результаты различных видов наблюдений за всеми составляющими климатической системы, космоса и внутренних земных процессов. Это важное замечание актуально на современном уровне климатологии, когда исследование климата часто сводится к исследованию результатов физико-математического моделирования климатической системы при отсутствии достаточных знаний о факторах изменений климата.

С одной стороны, признавая определенные успехи современной науки в физико-математическом моделировании, необходимо учитывать, что на данном этапе по моделям можно исследовать только сами модели на степень их приближения к описанию реальных процессов. Попытки построения или усовершенствования моделей должны следовать за новыми достижениями в области эмпирических исследований о факторах изменений климата.

С другой стороны, все результаты эмпирических исследований должны проходить проверку в моделях и давать основания как для новых эмпирических исследований, так и для совершенствования моделей.

А.С. Монин указывал, что климат формируется под действием ряда факторов, которые можно разбить на три группы [60]:

- внешние, или астрономические, факторы – светимость Солнца, положение и движение планеты в Солнечной системе, наклон ее оси вращения к плоскости орбиты и скорость вращения, определяющие воздействия на планету со стороны других тел Солнечной системы, ее инсоляцию (облучение солнечной радиацией) и гравитационные воздействия внешних тел, создающие приливы и колебания характеристик орбитального движения и собственного вращения планеты;
- геофизические и географические факторы – ряд особенностей планеты, из которых для климата Земли наиболее важными являются свойства подстилающей поверхности, и прежде всего те свойства, которые определяют ее динамическое и тепловое взаимодействие с атмосферой и обмен с ней термодинамически активными примесями. Из этих свойств, по-видимому, на первом месте должно быть названо географическое распределение континентов и океанов;
- атмосферные факторы – масса и состав атмосферы.

Несмотря на внушительный перечень указанных факторов климата, в 1970-е гг. возникал вопрос о том, почему за последние 0,6–1 млн лет каких-либо резких изменений климатообразующих факторов как будто не происходило, но было известно о резких колебаниях климата в прошлом – чередование ледниковых и межледниковых периодов продолжительностью в десятки тысяч лет. Накопленные факты показывают, что ответ кроется в недооценке чувствительности климатической системы к известным изменениям климатообразующих факторов. Возможно, перечень указанных в 1970-х гг. известных и предполагаемых факторов изменений климата не является полным.

В последующие годы странным образом взгляды на природу изменений климата все больше упрощались. Несмотря на то, что вопрос о причинах современного глобального потепления не является решенным, в публикациях Международной группы экспертов по изменениям климата (МГЭИК) [96] сделан вывод об антропогенном характере современного потепления, связанного с ростом концентрации CO_2 , метана и других парниковых газов в атмосфере: «С высокой степенью вероятности можно утверждать, что наблюдаемое увеличение концентрации антропогенных парниковых газов обуславливает основную часть глобального потепления второй половины XX века. Основной вклад в глобальное потепление вносит двуокись углерода посредством парникового эффекта в атмосфере».

Судя по большому количеству публикаций, на основе модельных оценок получен вывод о том, что быстрый рост выбросов парниковых газов является следствием интенсификации человеческой деятельности. Как раньше, так и в последнее время особенно, все больше появляется публикаций, в которых приводятся убедительные альтернативные сведения о природе повышения концентрации CO_2 в атмосфере. Например, CO_2 может выделяться из океана при повышении его температуры по некоторым естественным причинам, или повышение концентрации CO_2 может быть следствием дегазации Земли (процессы в недрах Земли). Так или иначе, но количество CO_2 в атмосфере увеличивается, и необходимо решить, может ли зафиксированное повышение концентрации CO_2 привести к такому потеплению климата, которое мы наблюдаем с середины XX века.

Закключение экспертов столь сильно повлияло на последующие исследования, что во многих климатических центрах мира вопросы о других факторах изменений климата перестали рассматриваться.

В [73] констатируется, что в настоящее время общепризнанными считаются только четыре возможных фактора климатических изменений, происходящих как в глобальном, так и в региональном масштабе: 1) антропогенный (и не только) эффект парниковых газов – главный фактор; 2) увеличение потока приходящей солнечной радиации

(обычно игнорируется); 3) уменьшение роли аэрозольного рассеяния; 4) внутренние колебания климатической системы, состоящей из атмосферы, океана, гидросферы, суши и криосферы. Указанный перечень основан на модельных оценках в предположении, что модели учитывают все факторы и адекватно отражают все процессы с их многосторонними прямыми и обратными связями во всех составляющих климатической системы. Хотя заведомо известно, что модели далеки от совершенства. Достаточно посмотреть работы, выполненные на эмпирических данных, и становится ясно, что для окончательных выводов необходимы новые исследования, выходящие за рамки моделей. Необходимы специальные программы по расширению наблюдений за изменяющимися состояниями климатической системы и необходимы новые идеи, выходящие за пределы геоцентризма.

Первое сомнение в безоговорочной антропогенной природе современного потепления основано на исторических фактах о климатах прошлого, согласно которым подобные и более сильные потепления климата наблюдались много раз в прошлом и каждый раз позднее сменялись похолоданием. Это происходило в доиндустриальную эпоху. Концентрация парниковых газов и глобальная температура в прошлом изменялись параллельно, как это следует из анализа ледяных кернов. Содержание газов в атмосфере действительно резко возросло за последние 100 лет, но современные изменения температуры не выходят за рамки ее естественных исторических флуктуаций в доиндустриальную эпоху [40].

Концентрация CO_2 в атмосфере подвержена природным колебаниям. В зависимости от температуры верхнего слоя океана CO_2 или усиленно растворяется в океане, или выделяется из океана в атмосферу. Величины природных потоков CO_2 из океана в атмосферу и из атмосферы в океан многократно превышают выбросы CO_2 в результате человеческой деятельности.

Можно ли быть уверенным, что существующие несовершенные модели океана с такой исчерпывающей точностью описывают состояние верхнего слоя океана, чтобы правильно оценить баланс естественных

длительных колебаний концентрации CO_2 и оценить влияние исключительно антропогенной добавки CO_2 в изменениях климата?

Учитывая мнения экспертов МГЭИК, можно признать наличие антропогенной составляющей в современных изменениях климата, но нельзя отбрасывать наличие естественных колебаний климата, которые всегда были и остаются. По мнению академика В.М. Котлякова: «Каковы бы ни были антропогенные изменения климата, они накладываются на его естественные вариации, масштаб которых все еще сильно превосходит влияния, обусловленные изменением облика поверхности Земли и эмиссией парниковых газов. ... Понимание и предсказание последствий роста концентрации парниковых газов в атмосфере (так называемое глобальное потепление вследствие парникового эффекта) требует понимания естественной изменчивости природных процессов, на которые накладывается антропогенное влияние» [40].

В зависимости от временного масштаба естественные колебания климата могут иметь как космическое происхождение, так и производные автоколебания в климатической системе. Уже невозможно отвергать космические циклы Миланковича и более внимательно следует относиться к несформировавшейся теории короткопериодных (от нескольких месяцев до нескольких лет и десятилетий) возмущений орбиты, скорости осевого вращения и прецессии оси вращения Земли. Нельзя безоговорочно отвергать огромный комплекс воздействий на Землю многокомпонентного явления под названием «солнечная активность» (интегральная и спектральная светимость Солнца, заряженные солнечные и космические частицы разных энергий, межпланетные магнитные поля, геомагнитное поле с его пространственно-временными аномалиями) и заменять его одной интегральной светимостью Солнца. Астрономия и солнечно-земная физика совсем не рассматриваются в моделях климата.

Колебания климата в масштабе истории инструментальных наблюдений могут быть следствием взаимодействий компонент климатической системы, например океана и атмосферы. Известно, что в климатической системе океан служит инерционной средой с медленными

изменениями, атмосфера менее инерционна и более переменчива, но содержит также и долгопериодные колебания, модулируемые океаном. А в океане циклические процессы в зависимости от масштаба могут иметь длительность от нескольких лет и десятилетий (верхние слои) до тысячелетий (глобальный «конвейер Брокера»).

Океан играет важную роль в меридиональном переносе тепла к полюсам, меняя глобальный климат. «Неверным оказалось предположение, что изменения в океане происходят очень медленно. Например, по Атлантическому океану к западу от Англии прокатываются тепловые волны с периодом 10 лет и амплитудой 0,05 °C» [40].

Из анализа циркуляции воды в океане следует, что в нескольких критических зонах небольшие колебания плотности воды, обусловленные образованием или таянием льда, могут существенно влиять на движение воды и, соответственно, на перенос тепла и климат. Критической для климата европейской части России оказывается глобальная циркуляция вод океана [40].

«Исследования последних лет показывают, что климатическая система – одна из сложнейших на Земле, требующая взаимосвязанного изучения глобальных изменений в океане, атмосфере, криосфере, почве, лесах и других системах. Невозможно вычленив из нее выбросы парниковых газов ...» [40].

По модельным оценкам, выбрасываемых человеком в атмосферу парниковых газов вполне достаточно, чтобы повысить глобальную температуру на величину, которая наблюдается в эпоху индустриализации. Если антропогенная гипотеза верна, тогда вытекающая из этого угроза экспоненциального потепления климата становится политической проблемой, требующей незамедлительных мер по ограничению выбросов парниковых газов. Эти меры сводятся преимущественно к сдерживанию промышленного развития общества и к большим экономическим потерям.

Если модели недостаточно точны, а современное потепление – лишь очередная фаза в естественных колебаниях климата и не зависит от антропогенных выбросов парниковых газов, тогда современные

негативные последствия потепления климата – лишь временное явление, после которого естественным образом начнется похолодание в сторону нормального климата. Поэтому главный вопрос – верны ли модельные оценки? В связи с важностью вопроса необходимо критически проанализировать и выявить слабые стороны существующих гидродинамических моделей климата.

Но прежде стоит упомянуть, что не только модели, но и специальные исследования современного потепления климата на основе эмпирических данных подтверждают наличие парниковой составляющей в потеплении климата, но ее вклад составляет по предварительным оценкам от 7 до 49 %. Такие выводы получены в [88] после всестороннего анализа сезонно-широтного изменения радиационного баланса нижнего слоя атмосферы и температурных трендов по 11 000 станциям Земли, включая анализ изменений по выборкам в условиях безоблачной и сухой погоды. Мы не можем проводить эксперименты с климатической системой для изучения причинно-следственных связей, но мы можем наблюдать за теми «экспериментами», которые сама климатическая система нам предоставляет. Продуманные выборки данных наблюдений и их сопоставление позволили в [88] доказать, что тренды потепления климата содержат парниковую составляющую при безоблачной сухой погоде. В таком случае усиление парникового эффекта можно отнести только на счет роста концентрации CO_2 , метана и других парниковых газов. Однако доказательство усиления парникового эффекта CO_2 еще не является доказательством антропогенной природы современного потепления. Вопрос о величине антропогенного вклада в изменение климата остается открытым. Не стоит забывать и другие возможные природные источники парниковых газов.

Целью настоящей монографии является взвешенное сопоставление разных подходов, взглядов и результатов исследований причин современных изменений климата. В этой связи представляется нелогичным в условиях огромной неопределенности бездоказательно полностью отвергать известные факты естественных колебаний климата на том основании, что в них много неясного и они не поддаются моделированию.

Парниковый эффект CO_2 физически более понятен в принципе, но количественная его сторона также не известна. Модели показывают, что наблюдаемых изменений концентрации CO_2 достаточно для наблюдаемых изменений климата. Но здесь надо проанализировать, как строятся эти модели, и не забывать, что модели показывают только то, что в них заложили авторы.

В России и за рубежом публикуется все больше работ, в которых полностью отвергается антропогенный фактор в современных изменениях климата, а в качестве альтернативы предлагается один из естественных факторов. Причем часто антропогенный фактор отвергается только на том основании, что современные изменения климата согласуются с изменениями одного из естественных факторов.

В последующих главах монографии будут приведены новые сведения о факторах изменений климата, обнаруженные при анализе эмпирических данных. Предполагается, что всесторонние знания о всех возможных факторах изменений климата и взвешенные обоснованные выводы позволят включить их в разработку новых физико-математических моделей. А новые модели должны дать ответ, каким будет климат XXI века с учетом всех естественных и антропогенных факторов, на основе прогноза как колебаний, так и изменений климата.

Накопленных сведений уже достаточно, чтобы не ограничиваться одной гипотезой об антропогенном углекислом газе с выводами о неминуемой термической катастрофе. Ответить на вопрос «Каким будет климат к концу XXI века?» невозможно раньше, чем будет получен исчерпывающий ответ на вопрос «Почему изменяется климат?».

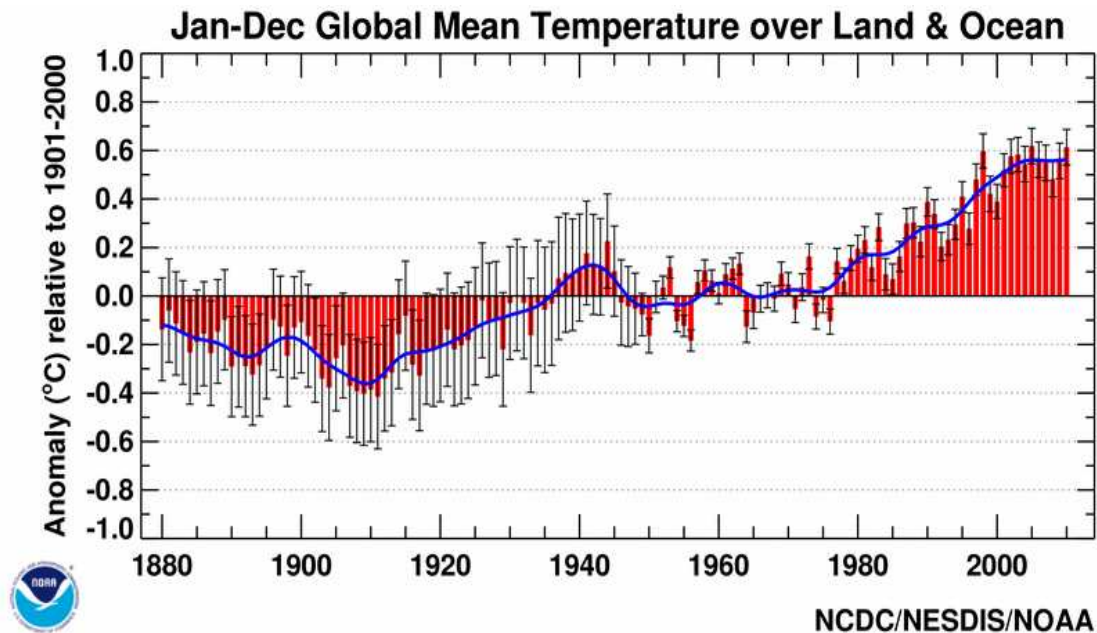


Рис. 1.1. Аномалии глобальной температуры Земли по данным Национального климатического центра климатических данных США, Управление океанических и атмосферных исследований. Аномалии от норм за 1901–2000 гг.

Рисунок из публикации на сайте <http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>

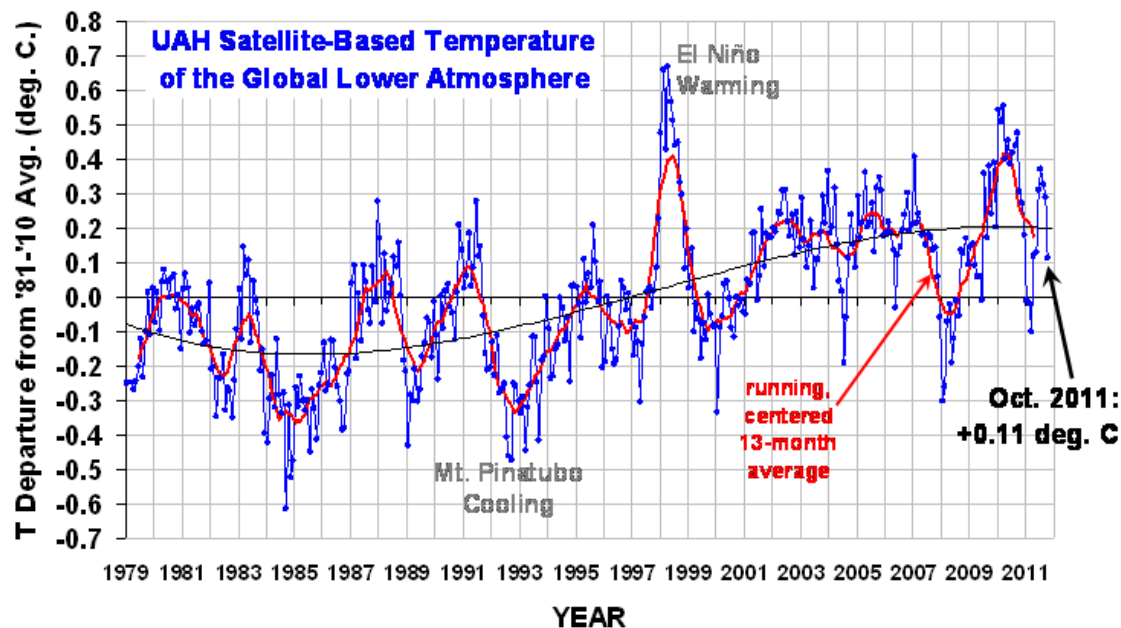


Рис. 1.2. Аномалии глобальной температуры нижнего слоя атмосферы по спутниковым данным NOAA (отклонения от норм за 1981–2010 гг.) <http://www.drroyspencer.com/latest-global-temperatures>

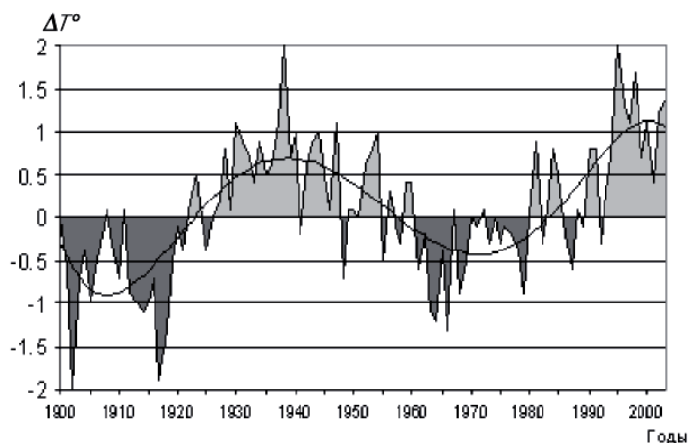


Рис. 1.3. Изменение аномалий среднегодовой температуры воздуха в широтной зоне 70–85 °с.ш. в XX веке и в начале XXI века и их 60-летняя составляющая [83]

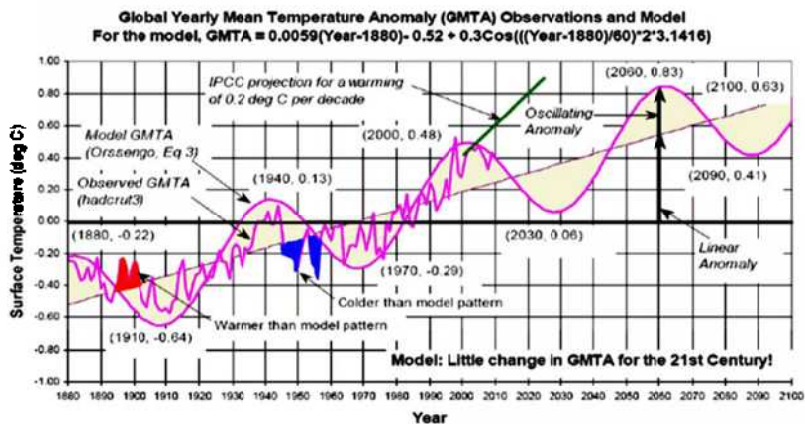


Рис. 1.4. Аномалии среднегодовой глобальной температуры (GMTA) и модель их описания. Рис. из [108]

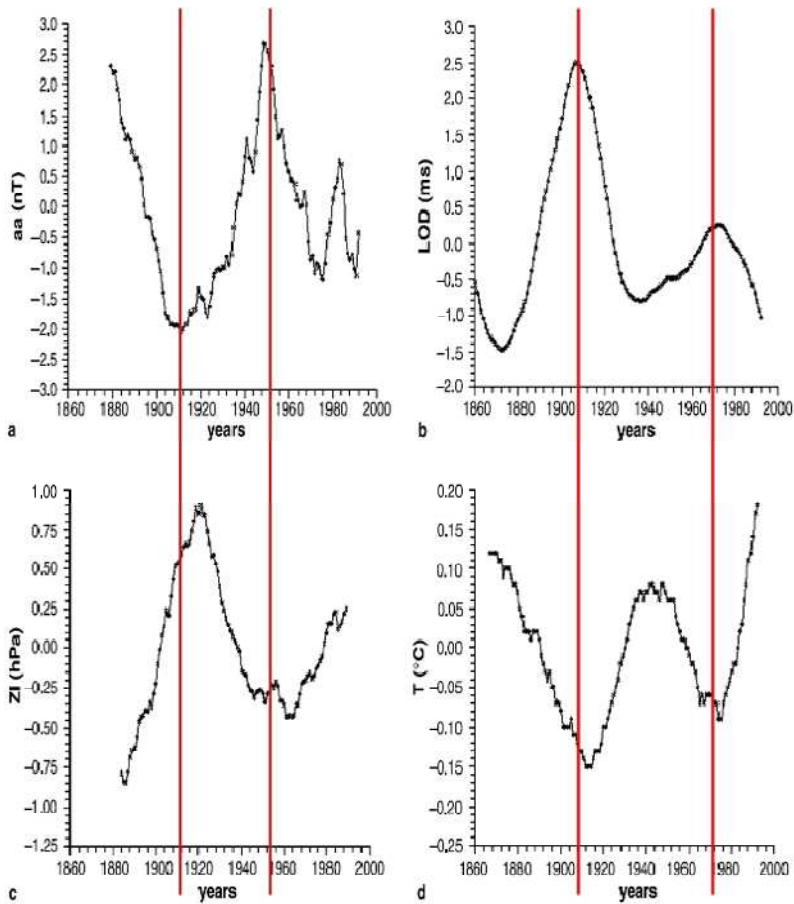


Рис. 1.5. Отклонения от тренда среднегодовых значений после сглаживания по 23 годам: а) индекс геомагнитной активности aa ; б) продолжительность суток LOD; в) индекс зональной циркуляции Северного полушария ZI; д) аномалии температуры воздуха Северного полушария. Рис. из [107]

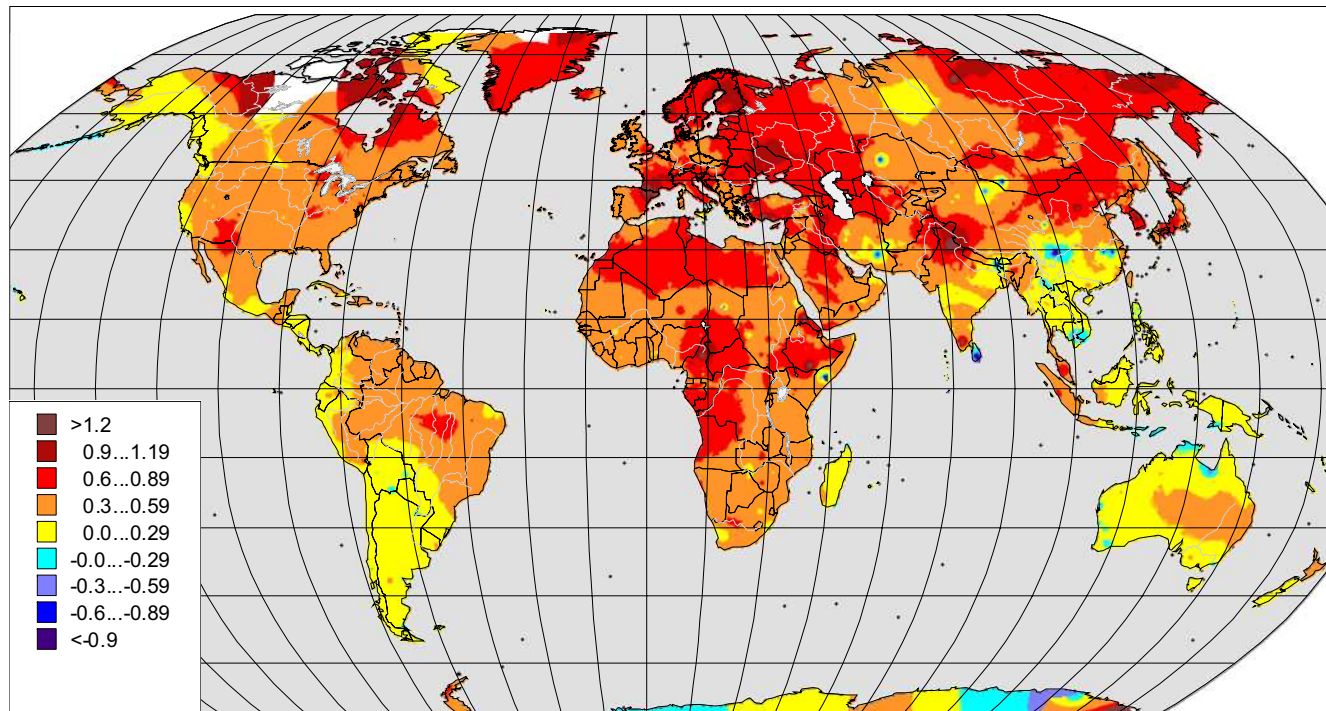


Рис. 1.6. Тренды среднегодовой температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет)

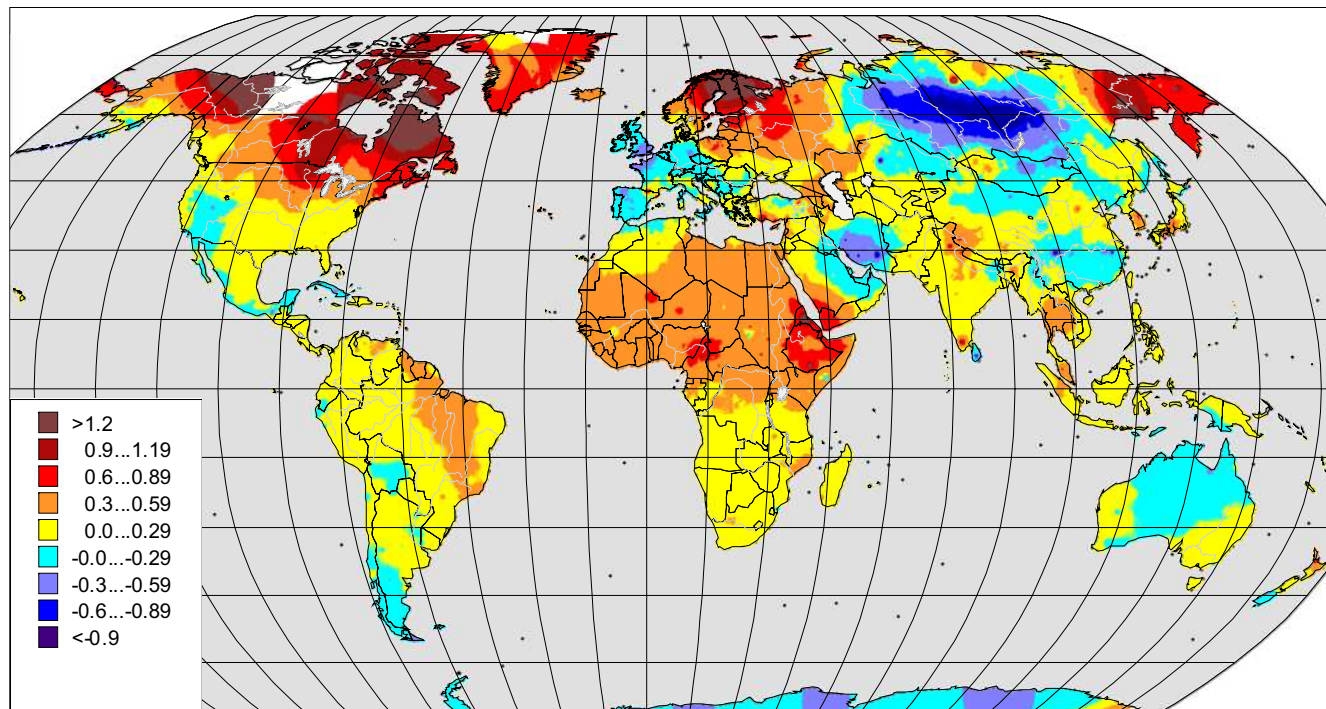


Рис. 1.7. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Декабрь

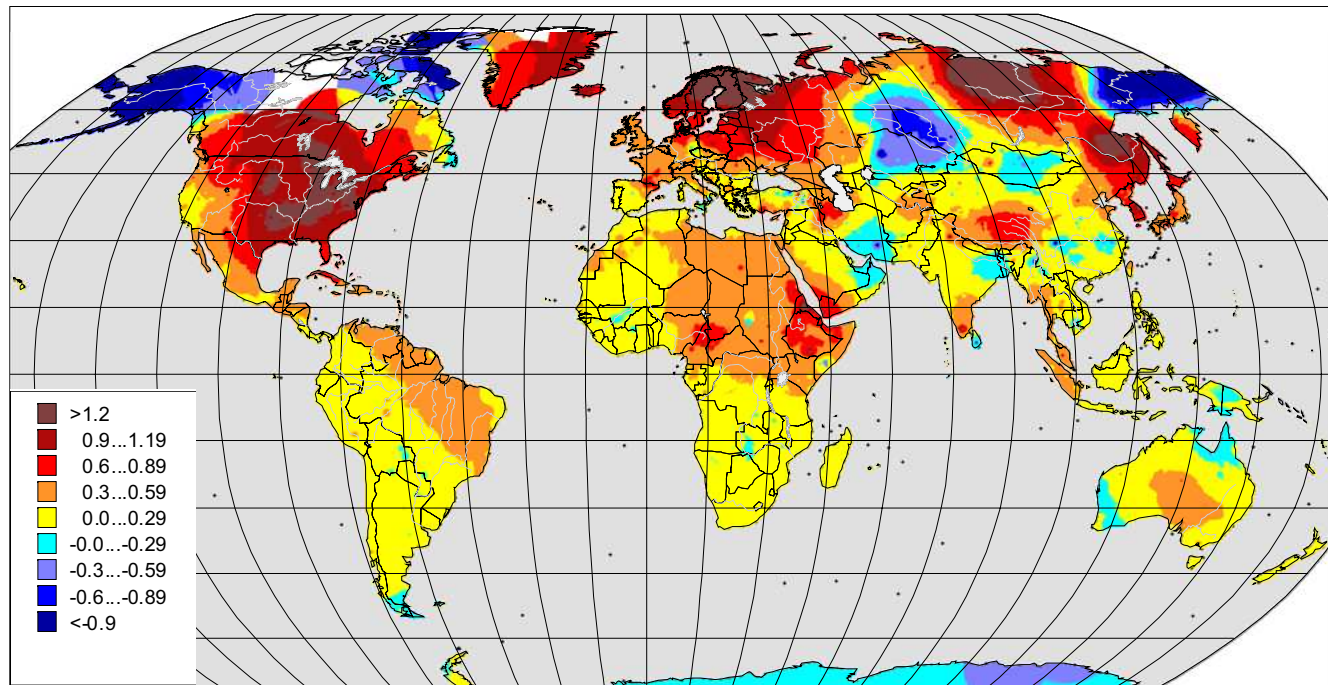


Рис. 1.8. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Январь

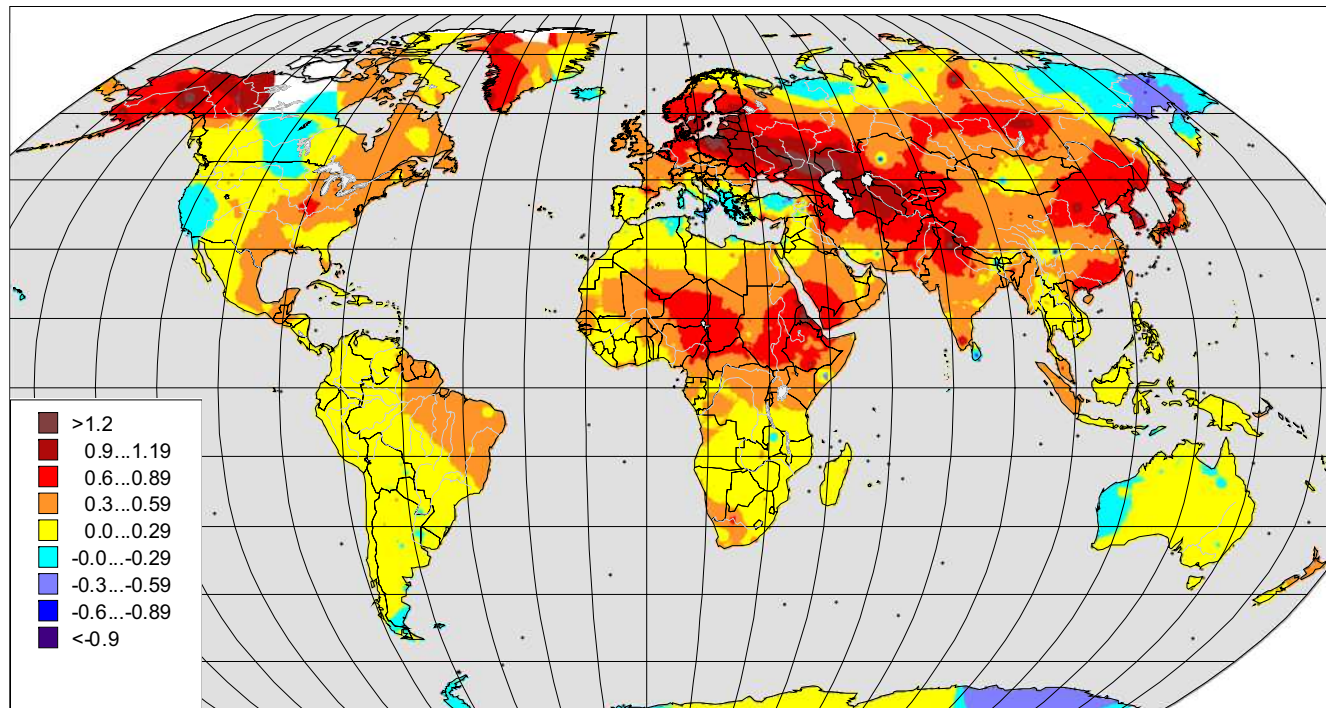


Рис. 1.9. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Февраль

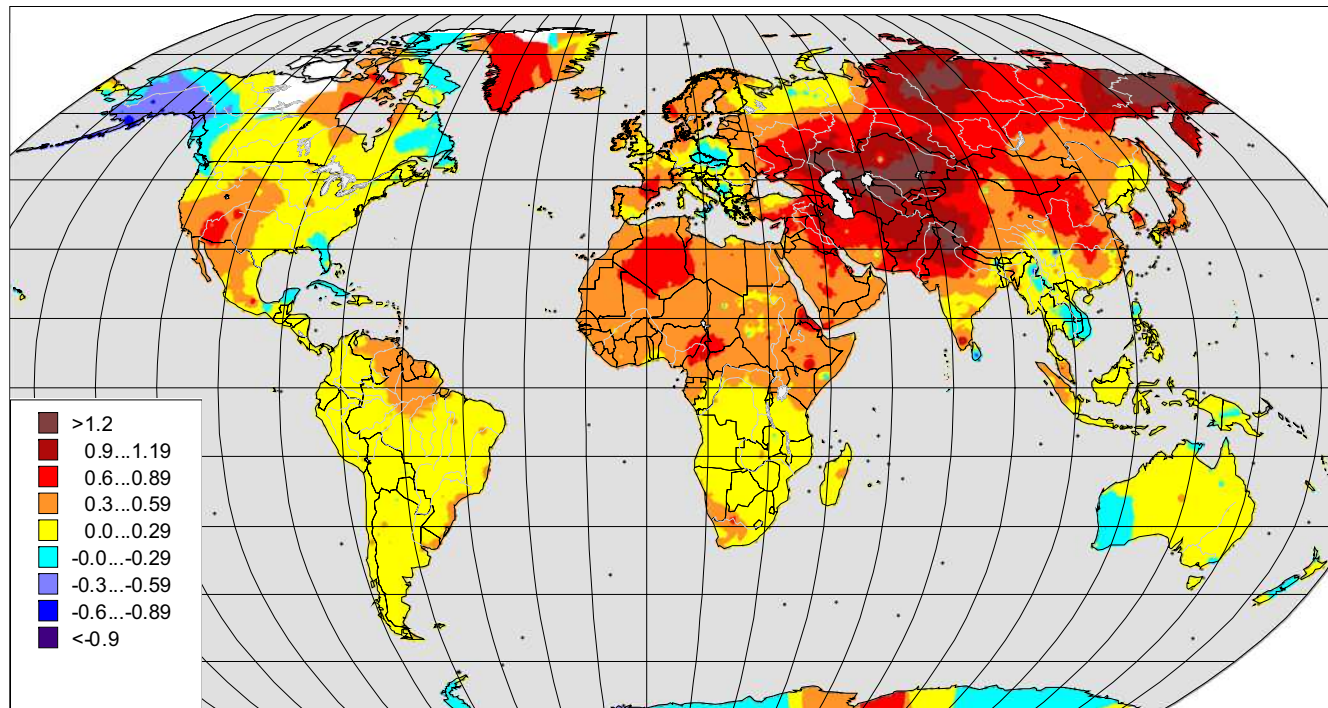


Рис. 1.10. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Март

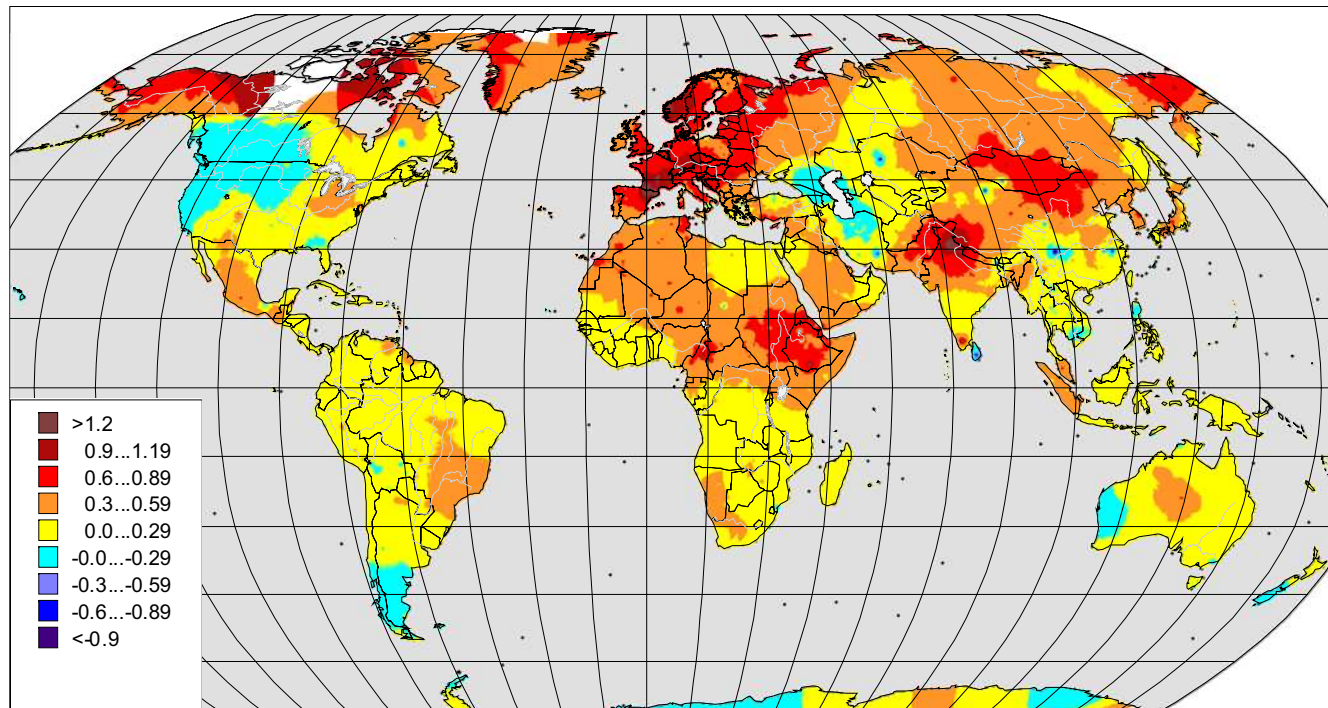


Рис. 1.11. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Апрель

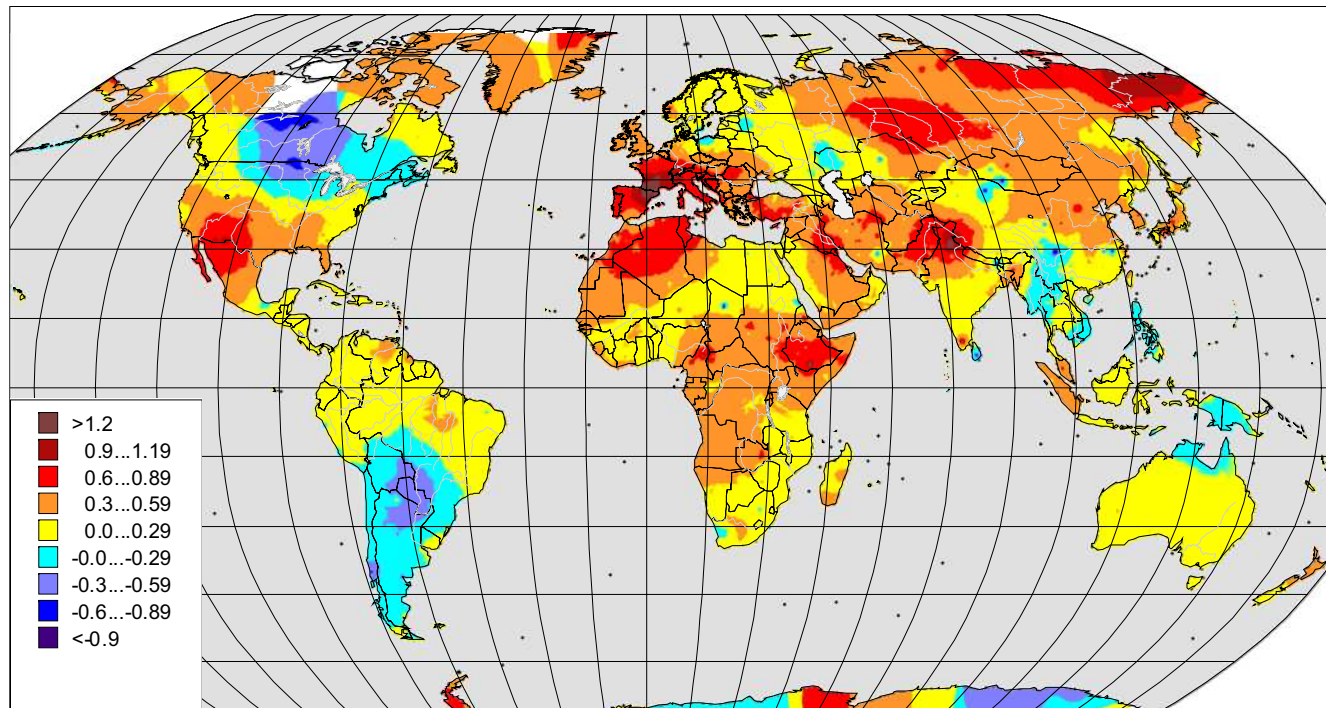


Рис. 1.12. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Май

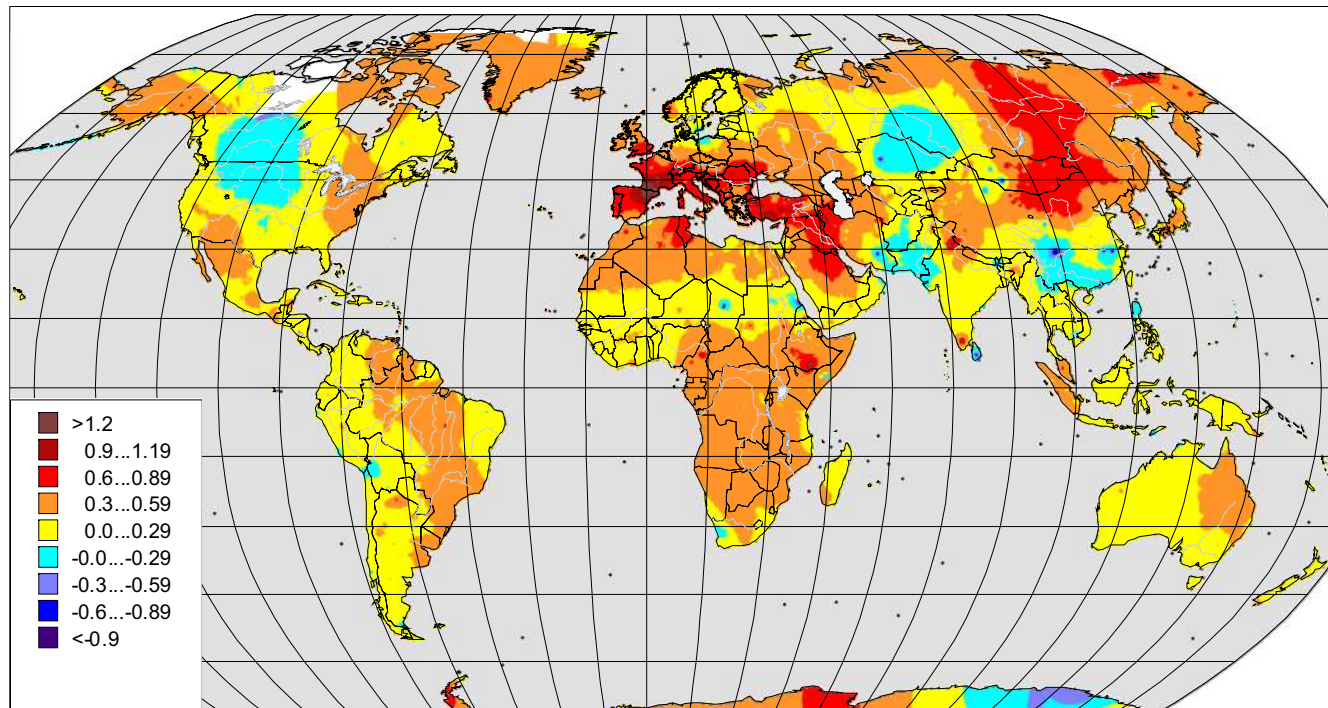


Рис. 1.13. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Июнь

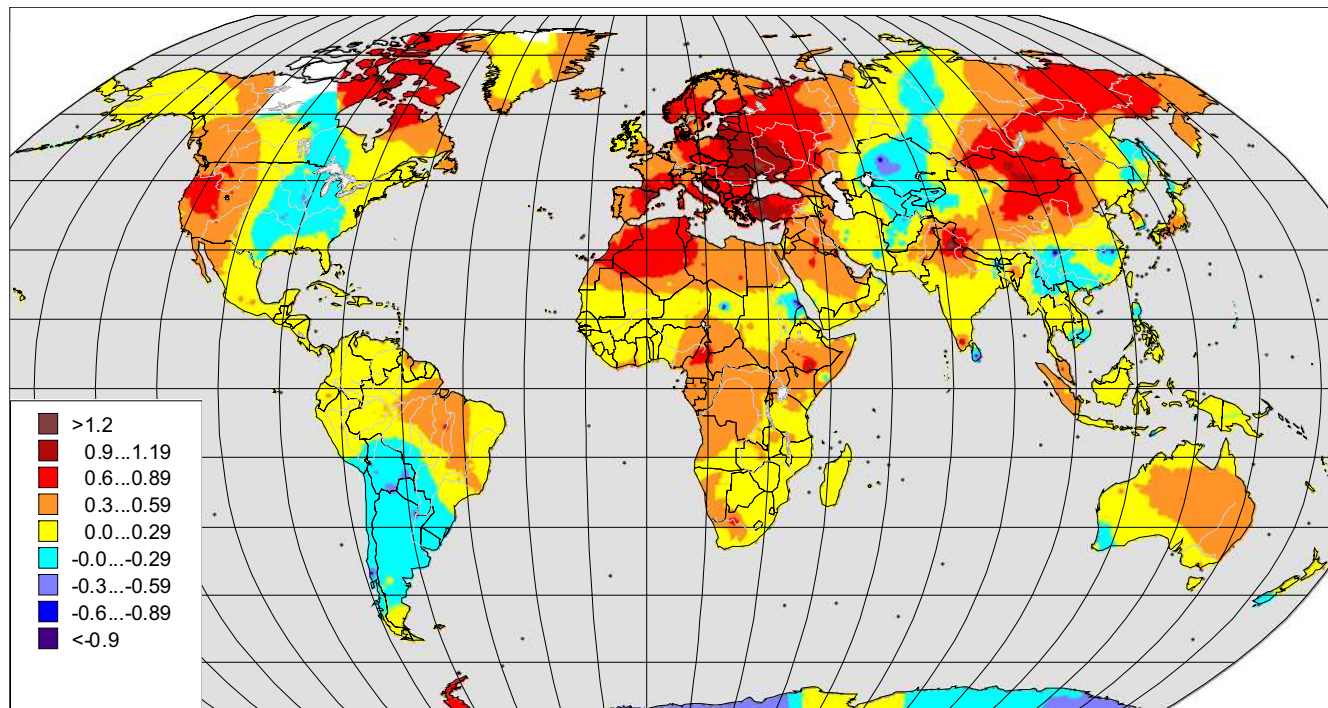


Рис. 1.14. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Июль

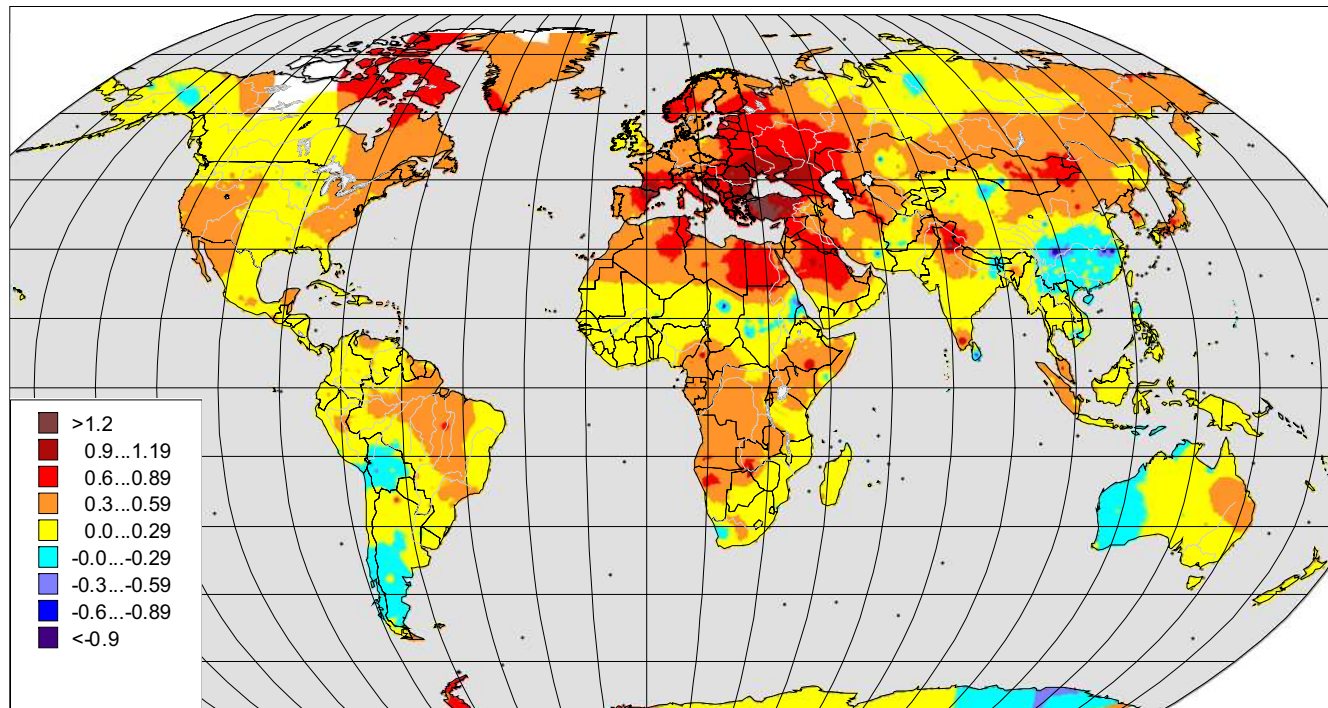


Рис. 1.15. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Август

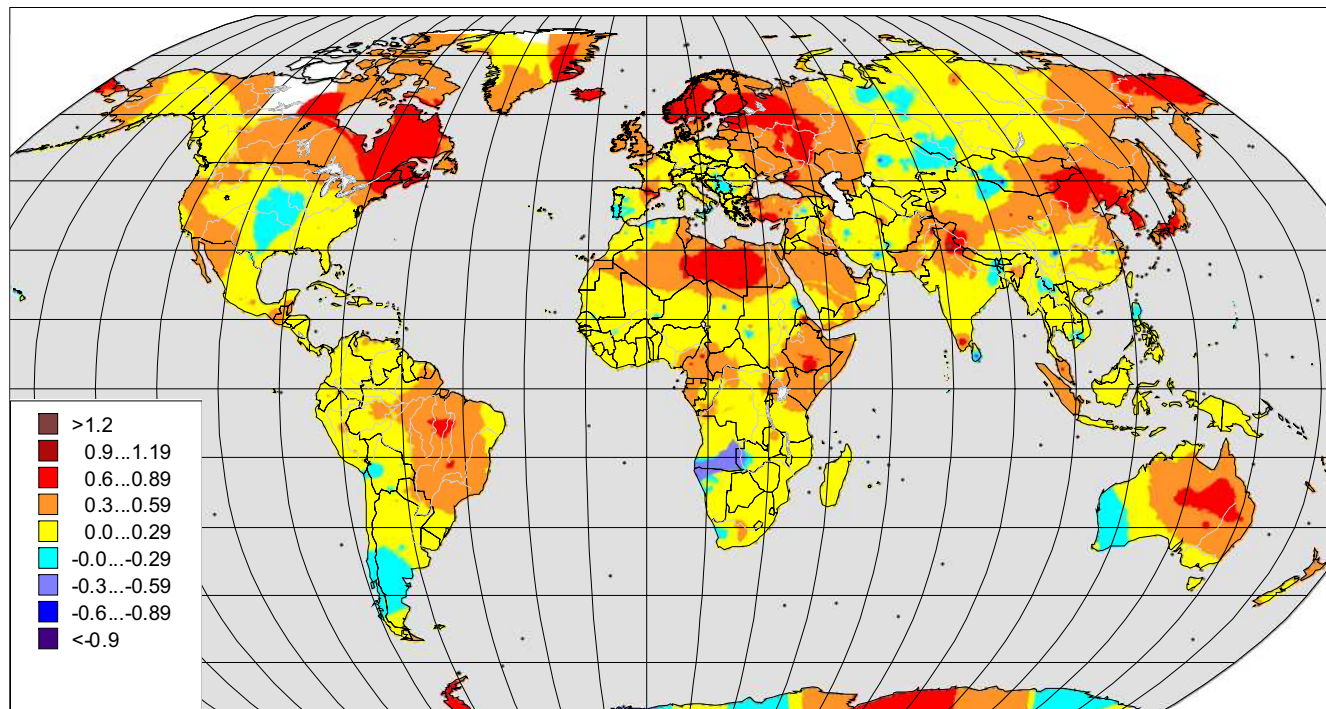


Рис. 1.16. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Сентябрь

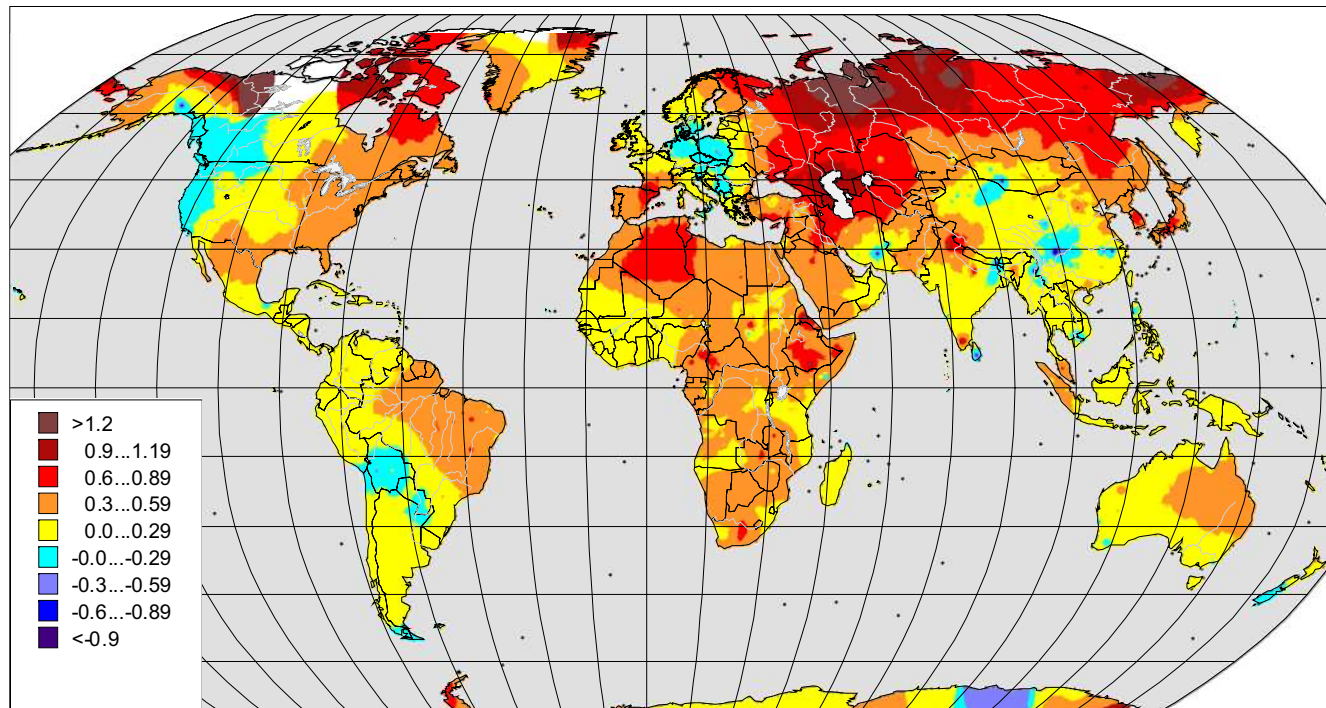


Рис. 1.17. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 г. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Октябрь

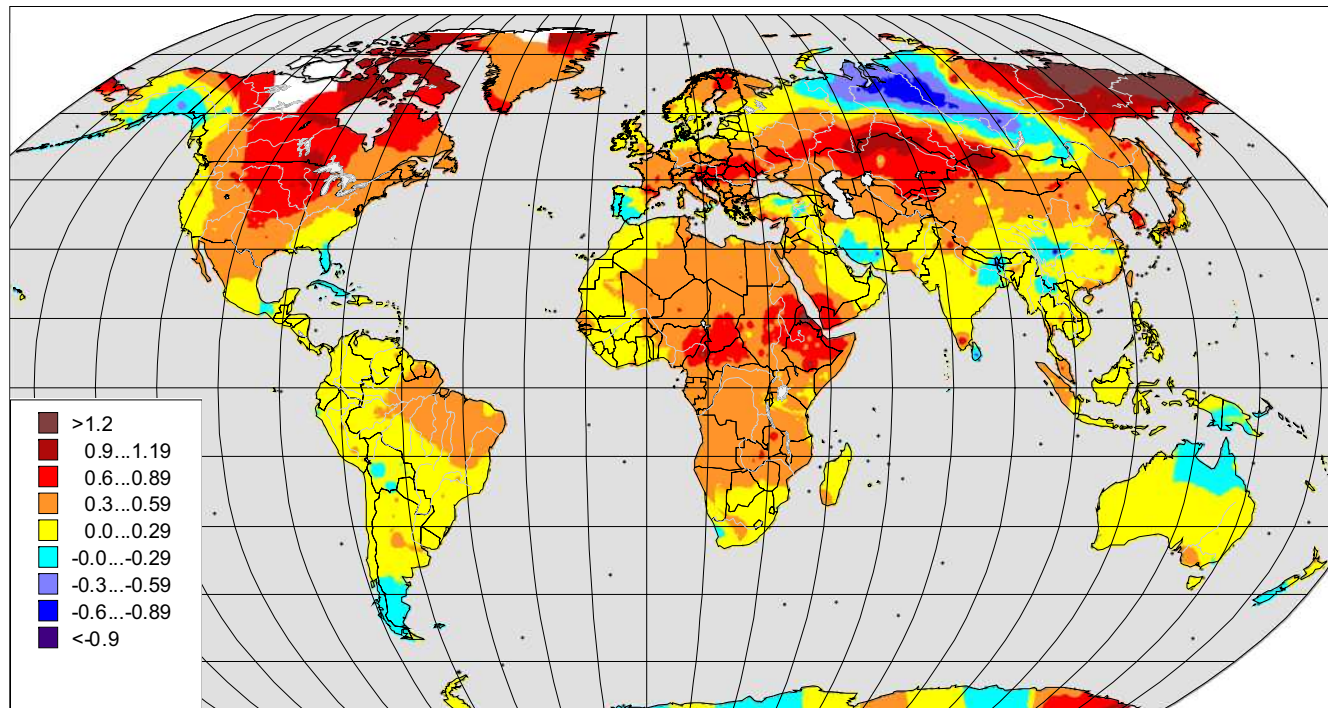


Рис. 1.18. Тренды среднемесячной температуры воздуха за 1976–2010 гг. (°C/10 лет). Ноябрь

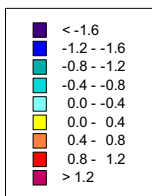
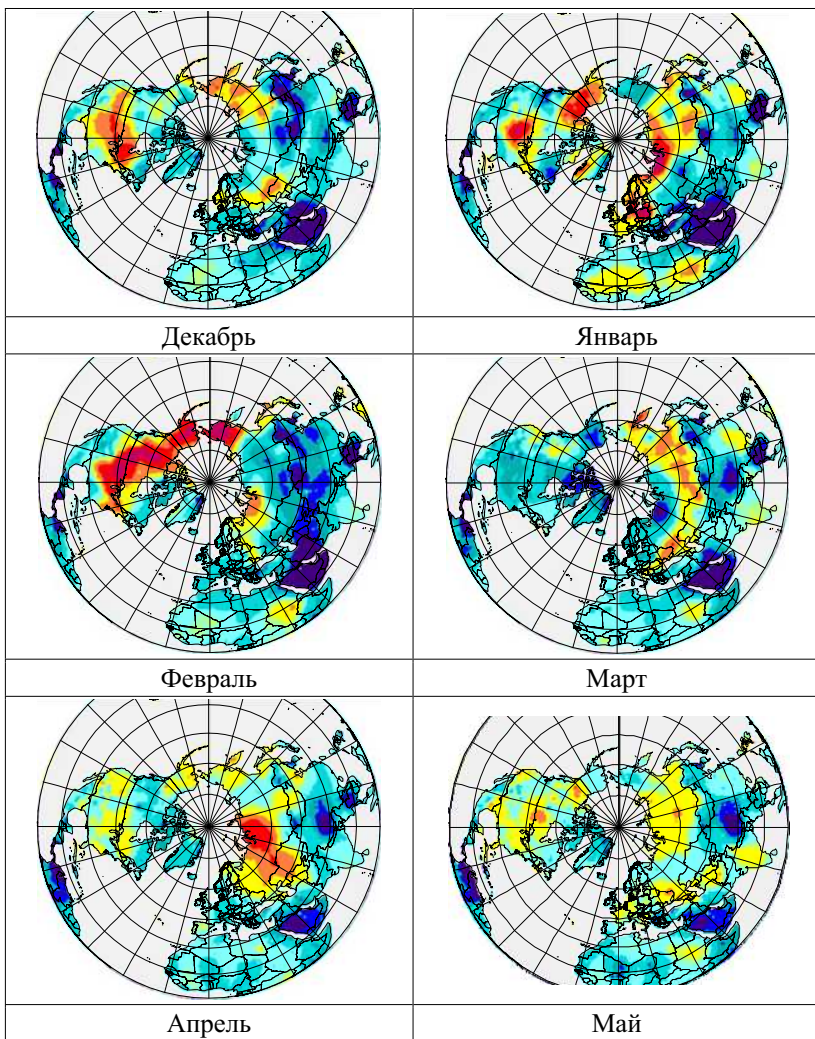


Рис. 1.19. Изменчивость климата за последние два тридцатилетия

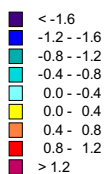
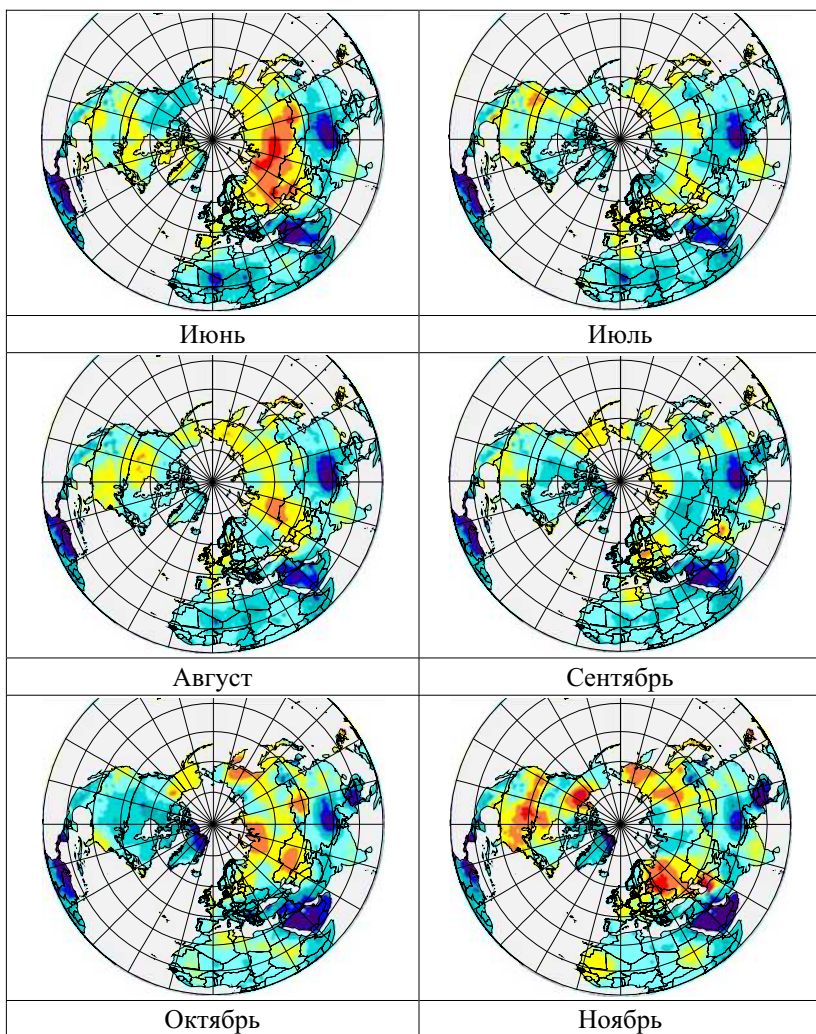


Рис. 1.20. Изменчивость климата за последние два тридцатилетия

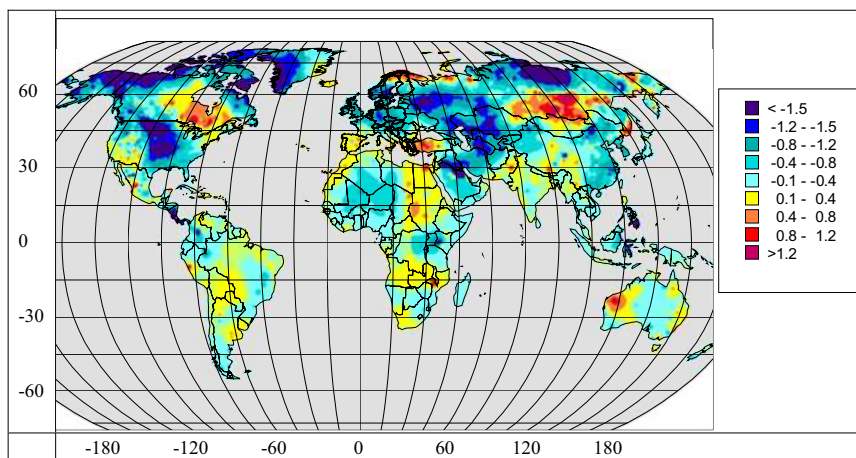


Рис. 1.21. Оценки временной изменчивости за 1974–2005 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Январь

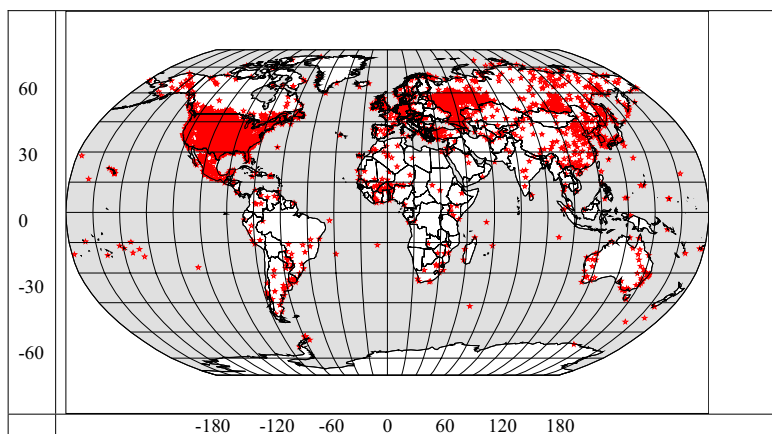


Рис. 1.22. Станции со значимыми оценками временной изменчивости. Январь

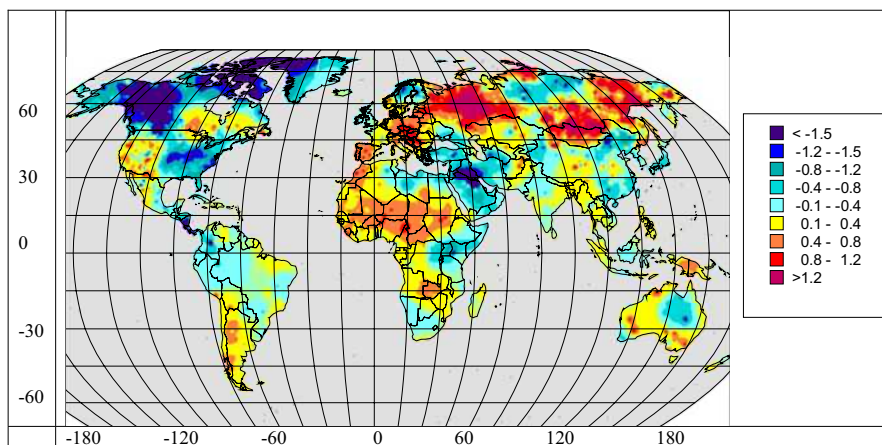


Рис. 1.23. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг.
(°C/10 лет). Февраль

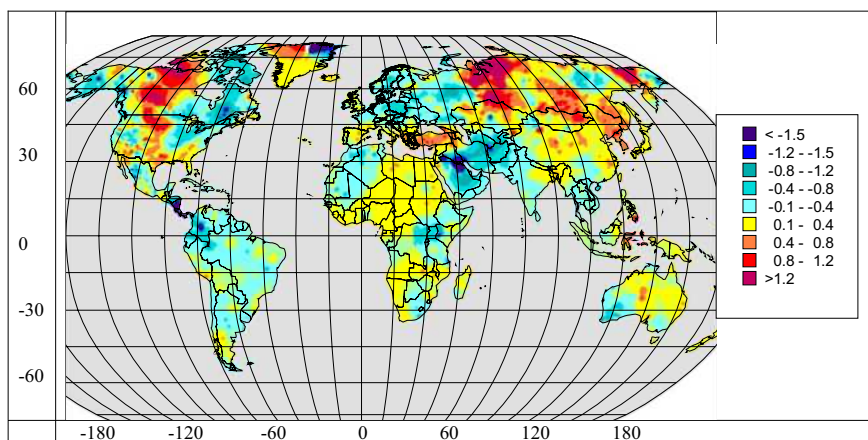


Рис. 1.24. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг.
(°C/10 лет). Март

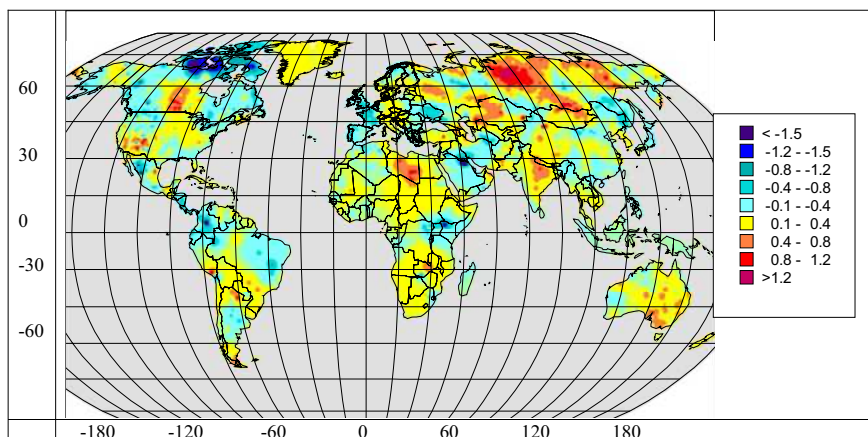


Рис. 1.25. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг. (°C/10 лет). Июнь

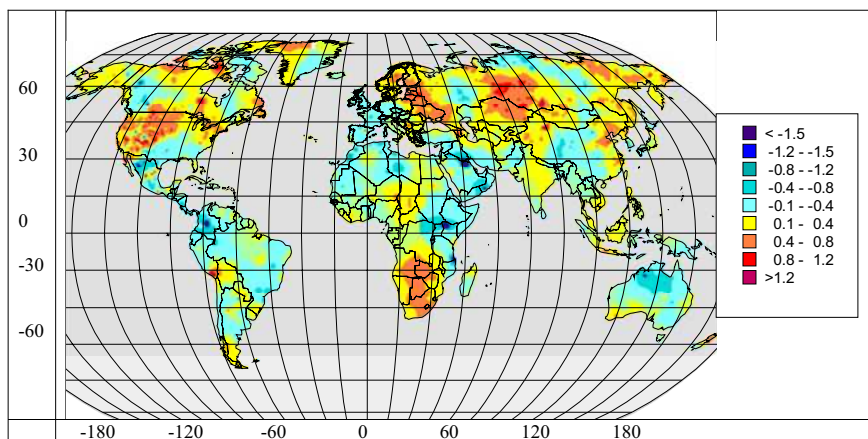


Рис. 1.26. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг. (°C/10 лет). Июль

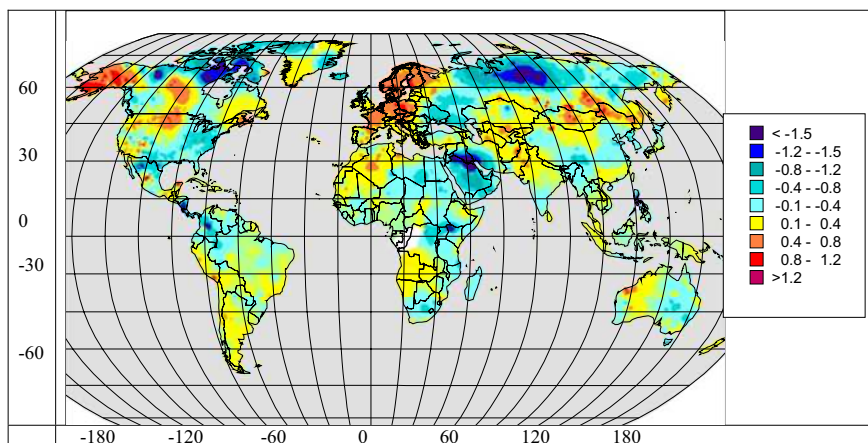


Рис. 1.27. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг.
(°C/10 лет). Октябрь

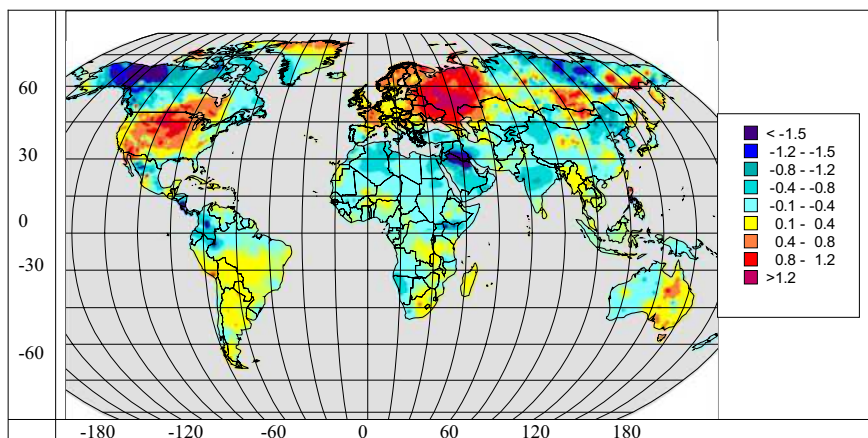


Рис. 1.28. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг.
(°C/10 лет). Ноябрь

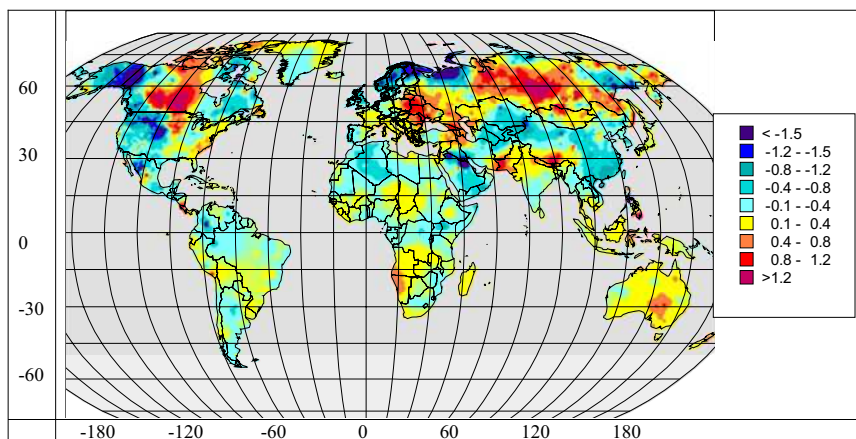


Рис. 1.29. Тренды временной изменчивости за 1974–2005 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Декабрь

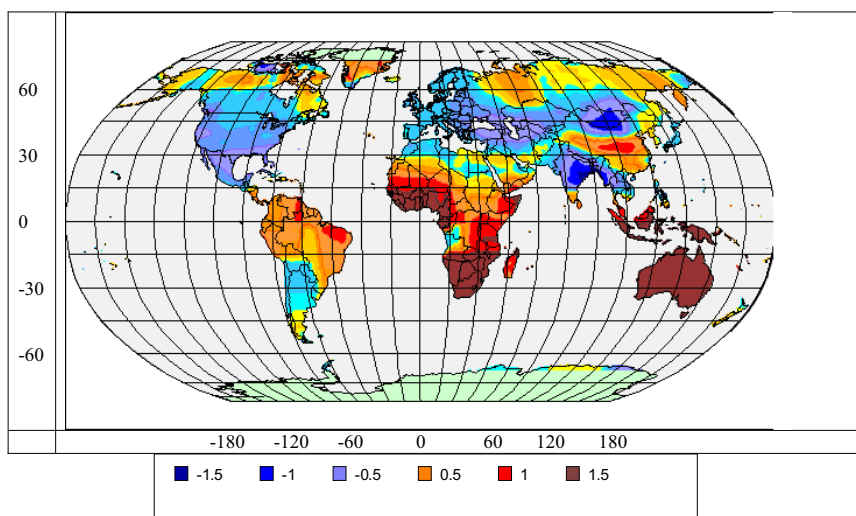


Рис. 1.30. Тренды ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) пространственного среднеквадратического отклонения среднемесячной температуры воздуха по квадратам. Январь

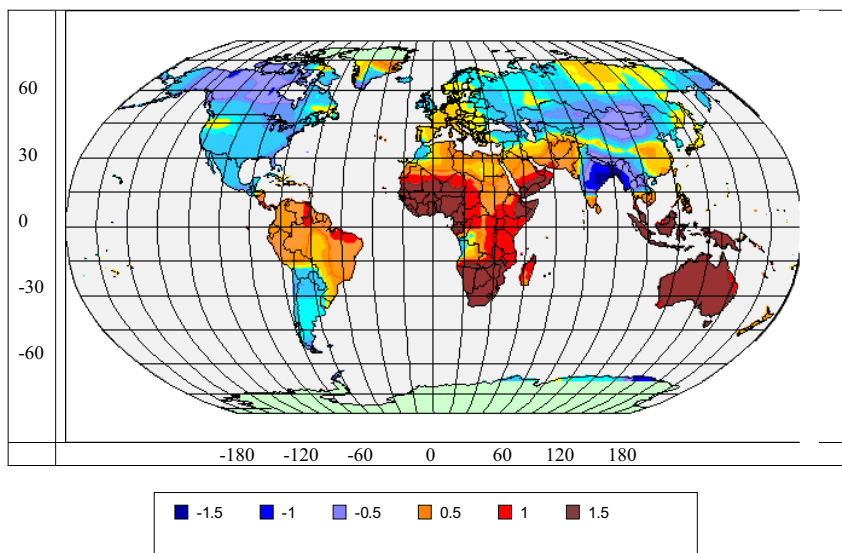


Рис. 1.31. Тренды ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) пространственного среднеквадратического отклонения среднемесячной температуры воздуха по квадратам. Апрель

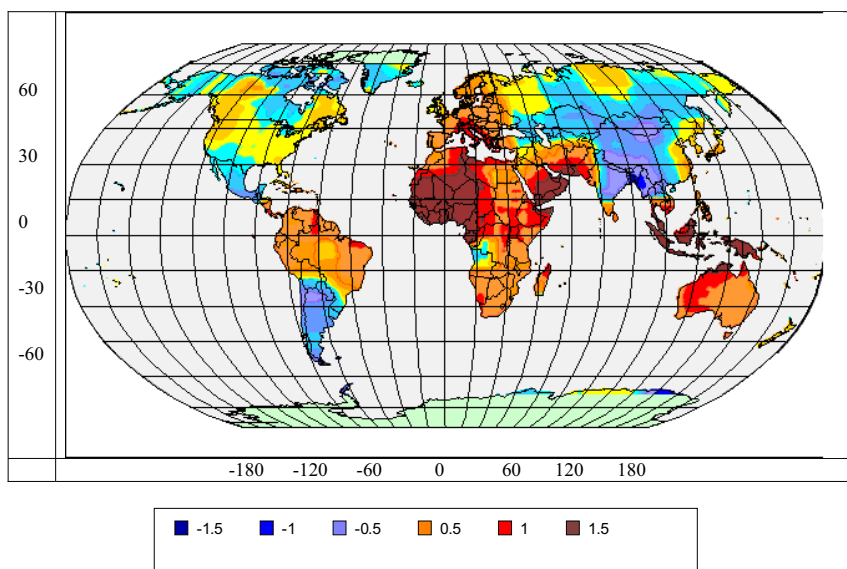


Рис. 1.32. Тренды ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) пространственного среднеквадратического отклонения среднемесячной температуры воздуха по квадратам. Июль

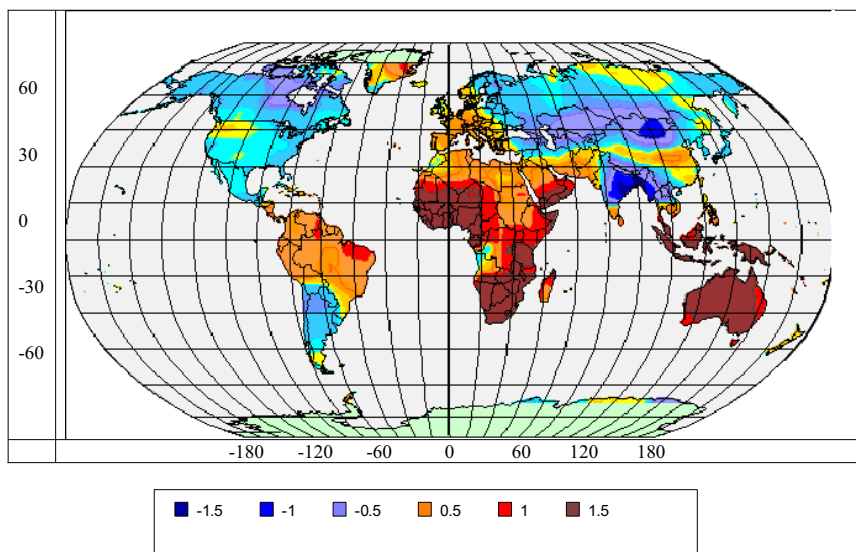


Рис. 1.33. Тренды ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) пространственного среднеквадратического отклонения среднемесячной температуры воздуха по квадратам. Октябрь

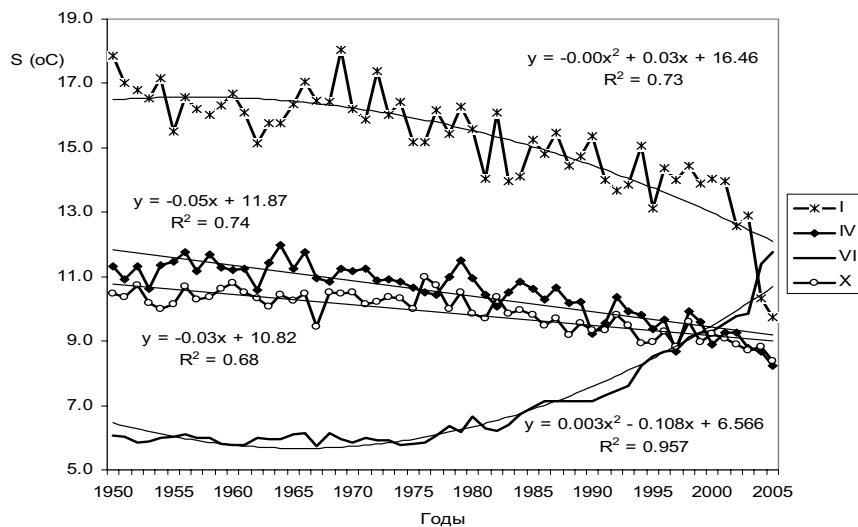


Рис. 1.34. Пространственная изменчивость (дисперсия) температуры воздуха над континентами Северного полушария

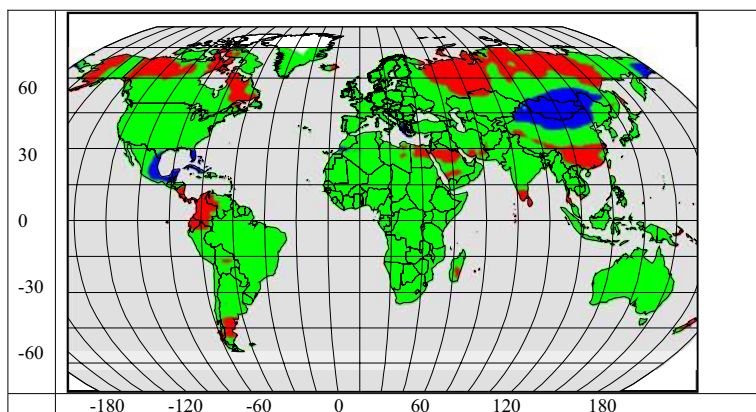


Рис. 1.35. Соотношение изменений климата и его изменчивости.
Январь

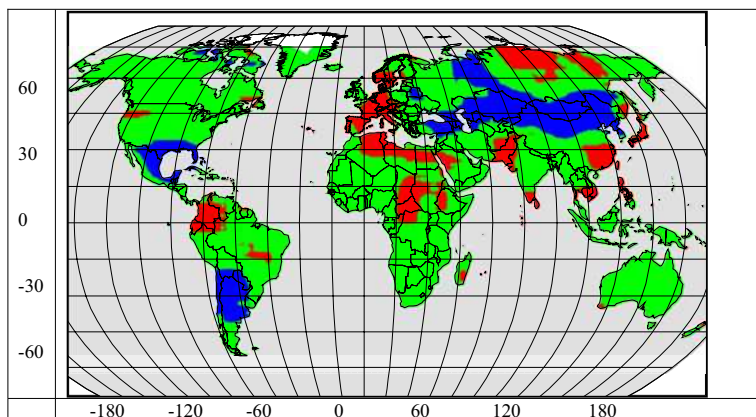
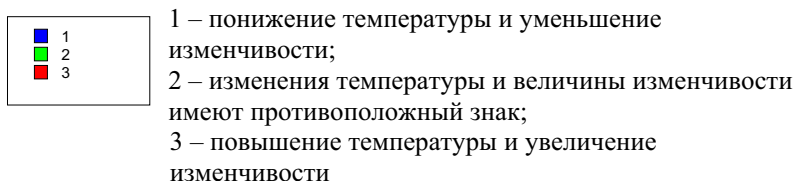


Рис. 1.36. Соотношение изменений климата и его изменчивости.
Апрель. (Обозначения см. рис. 1.35)

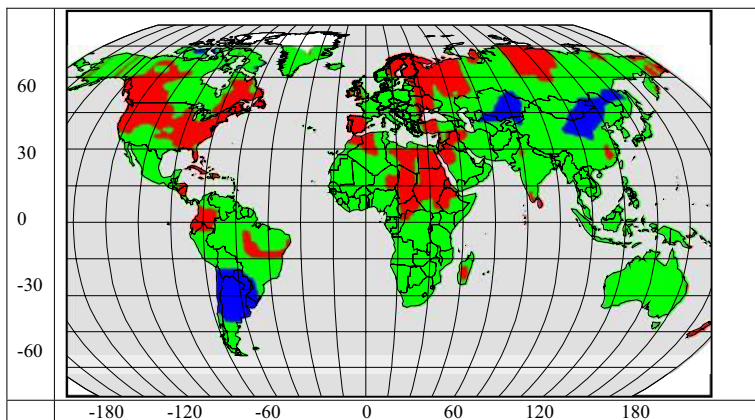


Рис. 1.37. Соотношение изменений климата и его изменчивости. Июль. (Обозначения см. рис. 1.35)

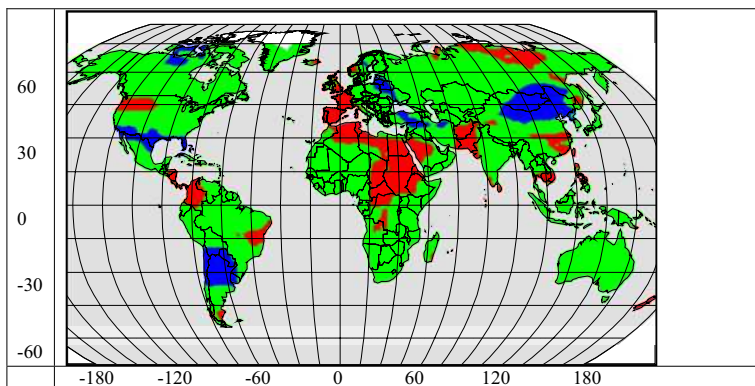


Рис. 1.38. Соотношение изменений климата и его изменчивости. Октябрь. (Обозначения см. рис. 1.35)

Глава 2. Изменения в океане и климат атмосферы

2.1. О влиянии океанов на колебания климата

Океаны покрывают около 71 % нашей планеты. Солнечное излучение поглощается в основном океаном в тропиках. Большая часть поглощенного тепла выделяется из океана вместе с водяными парами. При конденсации водяных паров выделяется тепловая энергия, которая разогревает атмосферу.

Океан является одной из важнейших составляющих климатической системы. Важное значение в теплообмене имеют течения в океане. Океанические течения вносят существенный вклад в региональный климат и в среднюю глобальную температуру.

Воды океана всегда находятся в движении. Циркуляция вод Мирового океана – единая взаимосвязанная система непрерывного движения, включающая волнение, приливы и отливы, морские течения, сгонно-нагонные явления, вертикальные движения вод. Благодаря циркуляции вод Мирового океана происходит постоянный обмен и перемешивание вод океанов. Вопрос о причинах течений принадлежит к неразработанным вопросам океанографии. При отсутствии общей теории существуют отдельные объяснения нескольких факторов.

Одним из факторов океанических течений являются приливы и отливы. Прилив – это периодическое колебание уровня океана или моря, обусловленное силами притяжения Луны и Солнца, а также другими приливообразующими силами. Однако силы приливов недостаточно для обеспечения существующих скоростей экваториальных течений.

Второй силой, способствующей возникновению течений вод в океане, являются ветры. Ветры в атмосфере (пассаты) признаются главной причиной экваториальных течений. Известно, что направление главных морских течений совпадает с направлением главных воздушных течений, а отклонения – это влияние берегов и силы Кориолиса.

Третьим фактором океанических течений является разность плотностей воды. Различие в плотности происходит от разности температур и разности солености. Соленая и теплая вода удерживается на поверхности океана силой Архимеда. Поверхностные слои воды, перемещающиеся от экватора в сторону полюсов, имеют избыток солености. Охлаждаясь в средних и высоких широтах в период зимних холодов, такая вода увеличивает свою плотность. В результате соленые воды погружаются на большие глубины. Процесс образования глубинных вод происходит как в северной части Атлантики, так и у берегов Антарктики [42]. Термохалинная циркуляция, приводимая в движение североатлантическими глубинными водами, является глобальным явлением, распространяющимся на Индийский и Тихий океаны. Предполагается существование колебаний климата, связанных с ослаблением и усилением термохалинной циркуляции, с периодами от нескольких лет до порядка 1000 лет [91]. Осцилляции глобального масштаба возможны благодаря существованию обратных связей в системе океан–атмосфера–континентальные льды. Например, когда в субтропиках испаряется значительное количество воды с поверхности океана, соленость оставшейся океанической воды возрастает. Эта вода с повышенной соленостью переносится в приполярные области, охлаждается и опускается на глубины. А влага, испарившаяся с поверхности океана в субтропиках, через атмосферную циркуляцию тоже попадает в приполярные области в виде осадков. Выпавшие осадки опресняют океанические воды и тем самым замедляют производство глубинных вод [91]. В зависимости от того, какой из процессов сильнее, перенос соленых вод или процесс их распреснения осадками, возможно существование двух климатических режимов. Одному режиму соответствует усиленная термохалинная циркуляция, которая может направлять в Северную Атлантику теплые воды даже из Южного полушария. Другой – «прохладный» – режим реализуется в условиях, когда избыток пресной воды в приполярных областях блокирует производство глубинных вод и «выключает» термохалинную циркуляцию. Существует глобальная система океанической циркуляции, которая перераспределяет тепло по всему миру. Теория глобального

конвейерного течения в Мировом океане утверждает, что региональные океанические течения объединены в одну общую систему [92, 93].

Исходя из этой картины сложилась концепция «солевых» осцилляций климата, связанных с ослаблением и усилением Атлантической термохалинной циркуляции [91]. В условиях потепления климата колебательные процессы обостряются. В результате таяния Гренландского ледника распреснение Ледовитого океана при повышении среднепланетарной температуры Земли может привести к еще большему распреснению вод Лабрадорского течения и снижению их плотности.

Согласно некоторым результатам численного моделирования климата, антропогенно обусловленное («парниковое») глобальное потепление климата может привести к ослаблению (и даже коллапсу) термохалинной циркуляции в Северной Атлантике. Позднее специальные исследования показали, что в течение XXI века значительного изменения термохалинной циркуляции произойти не должно [101].

На самом деле взаимосвязь между изменениями солености, температуры воздуха и формированием глубинных вод изучена слабо. В некоторых публикациях указывается, что глубинная циркуляция приводится в движение перемешиванием, а не погружением холодной воды в высоких широтах. Источниками энергии для перемешивания служат ветры и приливы. Однако известно, что климат может изменяться внезапно, а также то, что океанская циркуляция в Северном полушарии обладает очень низким порогом чувствительности, при переходе которого происходят существенные изменения океанической циркуляции. В [111] указано, что 11 704, 12 896 и 14 694 года назад, от 2000 года, температура поверхностных вод, из которых образовывались осадки, выпадающие в Гренландии, увеличивалась на 2–4 °C в течение 1–3 лет. При этом 11 704 года до 2000 года температура воздуха над Гренландией повышалась примерно на 10 °C за три года.

Независимо от причин, океанический конвейер работает. Часть океанического конвейера, находящаяся в Атлантическом океане, известна под названием «течение Гольфстрим». Гольфстрим является важнейшим элементом формирования климата Европы и Западной Сибири. Его влияние на климат очевидно, но и другие составные невидимые части океанического конвейера не менее важны для климата.

В разных районах в океанах возникают колебания метеорологических характеристик, получившие собственные названия, такие, как десятилетнее Тихоокеанское колебание (Pacific Decadal Oscillation – PDO), Эль-Ниньо – Южное колебание (El Niño – Southern Oscillation – ENSO) и Атлантическое многолетнее колебание (Atlantic Multidecadal Oscillation – AMO). Еще в 1970 году было отмечено, что перераспределение тепла на Земле морскими течениями составляет один из основных климатообразующих факторов на Земле [53].

Океан является основным поглотителем тепла, поступающего к поверхности Земли от Солнца. Он отражает только 8 % потока солнечного излучения, а 92 % поглощают его верхние слои. Полученное тепло океан расходует на испарение 51 %, 42 % тепла уходит из океана в виде длинноволнового излучения, которое частично задерживается в атмосфере или уходит в космос, остальные 7 % тепла нагревают воздух при прямом контакте (турбулентный обмен). Океан, нагреваясь в основном в тропических широтах, переносит тепло течениями в умеренные и полярные широты и охлаждается. Средняя температура воды всей толщи океана гораздо ниже поверхностной температуры – всего 5,7 °C, но она все же на 22,7 °C выше средней температуры всей земной атмосферы. Из этого следует, что океан выступает как основной аккумулятор солнечного тепла [48].

Удельная теплоемкость воды в четыре раза больше удельной теплоемкости воздуха, а скорость преобразования энергии в атмосфере во много раз превышает скорость ее трансформации в океане. В системе океан–атмосфера океан служит инерционной средой, медленно накапливающей изменения. Атмосфера же представляет собой нестационарную часть, глобальная долгопериодная устойчивость которой поддерживается океаном.

Процесс преобразования энергии в климатической системе В.В. Шулейкин описал на основе понятия природных тепловых машин разных масштабов. Природная тепловая машина первого рода работает на контрасте экватор–полюс. Машина второго рода отвечает за обмен воздушными массами между океаном и континентами – муссонную циркуляцию, которая меняет в течение года направление в соответствии

с тем, как меняют свою относительную роль источников и стоков тепла континенты и океаны. По мнению [42], движущим механизмом климатических изменений на Земле является тепловая машина «нулевого рода». Она работает за счет глобального контраста в температуре и солености между отдельными бассейнами Мирового океана. Изменения переноса между этими областями и влияют на климат.

Области морей и океанов, характеризующиеся высоким испарением, производят интенсивный энергообмен с атмосферой. Северная Атлантика является такой энергоактивной областью глобального значения. Тепловой баланс Северной Атлантики – отрицательный, этот бассейн отдает тепло в атмосферу. Если бы сюда не поступала тепловая энергия из других частей Мирового океана через Южную Атлантику, то температура ее поверхностных вод постоянно бы понижалась. Современный благоприятный климат Европы обусловлен дополнительным теплом, переносимым в Атлантику из других океанов.

Океан двояко участвует в формировании регионального и глобального климата: во-первых, он выступает как переносчик тепла из низких широт в высокие географические широты; во-вторых, океан является стабилизатором, или демпфером, всех колебательных термических процессов в атмосфере.

В трехмерном океане течения испытывают колебания во всех плоскостях с переменной интенсивностью. Огромная теплоемкость слоя взаимодействия океана с атмосферой всегда определяет доминирование океана над атмосферой в их взаимодействии. Исключение возможно только в тонком верхнем слое океана, на который могут проникать короткопериодные колебания термодинамического режима приповерхностной атмосферы. Сезонные и межгодовые колебания термодинамического режима океана не связаны с воздействием атмосферы, а определяются циркуляционными процессами в глубинах океана. Поэтому теплообмен океан–атмосфера является генератором долгопериодных колебаний температуры, влажности и ветра в атмосфере.

Важнейшей и пока малоизученной характеристикой взаимодействия атмосферы и океана является толщина верхнего слоя перемешивания

океана. Слой перемешивания является слоем термического взаимодействия океан–атмосфера. Переменная во времени толщина этого слоя определяет термическую инерцию океанических процессов в нем, периоды, амплитуды и время запаздывания термических колебаний на границе океан–атмосфера и в атмосфере. С одной стороны, эти колебания являются вынуждающими колебаниями в атмосфере, которые порождают в ней серии собственных короткопериодных колебаний, модулированных по амплитуде и фазе долгопериодными океаническими колебаниями. С другой стороны, другие собственные колебания атмосферы, которые могут возникнуть без участия океана (другие факторы), будут демпфироваться океаном по амплитуде и сдвигаться по фазе. При этом даже периоды колебаний будут плавающими. Такова реальная картина. Океан во взаимодействии океан–атмосфера всегда рассматривался как стабилизирующая составляющая (это справедливо при неизменном слое термического взаимодействия – перемешивания), но он же является модулятором долгопериодных колебательных воздействий на атмосферу. Атмосфера откликается вынужденными долгопериодными колебаниями своих параметров и в то же время на долгопериодные воздействия периодически откликается сериями собственных колебаний. Каждое новое воздействие сопровождается запуском новой серии собственных колебаний атмосферы. По фазе новые колебания атмосферы не обязаны совпадать с предыдущими. Наложение затухающих старых атмосферных колебаний и возникших новых колебаний с разными фазами приводит к сложной их суперпозиции. Учитывая, что каждый раз океан генерирует в атмосфере не одно, а серию колебаний разных частот, то наложение серий колебаний приводит к результирующим колебаниям, в которых разрушены все цикличности и корреляции с вынуждающими колебаниями. При этом и простые вынужденные колебания выделить становится проблематично. Таким же образом атмосфера реагирует на любые долгопериодные воздействия. Понимание этого приводит к необходимости планирования специальных статистических экспериментов для поиска предполагаемых закономерностей. Этому посвящен раздел в конце главы.

В исследованиях теплообмена океан–атмосфера необходимо оценивать потоки тепла между атмосферой и некоторым слоем перемешивания в океане. Толщина этого слоя сильно варьирует в зависимости от района и сезонов года, но данных о нем нет. Необходимо учитывать теплозапасы всего слоя океана, участвующего в теплообмене, а температура поверхности океана малоинформативна. Поэтому полезными являются оценки теплосодержания некоторого верхнего слоя океана, даже если толщина его фиксирована. В [106] приводится график изменения теплосодержания верхнего 700-метрового слоя Мирового океана (рис. 2.1), демонстрирующий положительный тренд, на который накладываются многолетние колебания.

Примечательно, что после 2004 года не наблюдается повышения теплосодержания океана. В глобальной температуре, как было показано в разделе 1.2, повышение прекратилось значительно раньше.

2.2. Инерционность элементов климатической системы

Изменения глобального климата имеют существенные сезонные различия, которые являются следствием всего комплекса физических процессов, происходящих в климатической системе. Сезонный ход метеорологических элементов и его особенности в различных регионах Земли определяются прежде всего количеством солнечной радиации, получаемой земной поверхностью и океаном в течение суток, т.е. солнечной инсоляцией. Инсоляция определяется сезоном и географической широтой места, а также некоторыми астрономическими факторами, которыми в нашем случае можно пренебречь. Важнейшим фактором формирования сезонного хода температуры является межсезонное взаимодействие атмосферы и океана. Это взаимодействие частично динамическое, но в значительно большей мере – тепловое [20, 24].

В тропической зоне Мирового океана поглощается огромное количество солнечной радиации. Накопившееся там тепло переносится в более высокие широты, становясь важным фактором смягчения климата

умеренных и полярных широт в холодную половину года. За год атмосфере с акватории океана передается примерно в два раза больше тепла, чем с поверхности суши [23]. Около 80 % тепловой энергии, поступающей в атмосферу из океана, является результатом высвобождения скрытой теплоты парообразования. Эта энергия отнимается у океана при испарении с его поверхности и отдается атмосфере при конденсации [58]. Под воздействием притока тепла и водяного пара от океана на континент меняется температура и влажность воздушных масс над континентом. Повышение содержания водяного пара над континентами усиливает естественный парниковый эффект атмосферы.

Океан со своей огромной теплоемкостью и тепловой инерцией воздействует на атмосферу и приводит к искажениям сезонного хода температуры воздуха, обусловленного инсоляцией. Искажения заключаются в уменьшении амплитуды годового хода метеорологических элементов и в запаздывании фаз наступления максимума и минимума сезонного хода температуры. Эти искажения наиболее заметны на континентах вблизи океанов и даже на огромных расстояниях вдали от океанов. Так формируются различные типы климата регионов: морской, умеренно континентальный, континентальный и др. В морском и умеренно континентальном климате экстремумы годового хода наступают на один-два месяца позднее экстремумов инсоляции. В результате этого весна в морском климате холоднее осени.

Амплитуда годового хода инсоляции, а, следовательно, и температуры зависит от географической широты, поэтому для выделения влияния океана на климат регионов используют так называемые индексы континентальности климата, в которых влияние широты нивелируется и выделяется только та часть изменения амплитуды годового хода, которая, по определению, является следствием влияния океана на региональный климат. Например, индекс континентальности по С.П. Хромову и индексы других авторов вычисляются по амплитуде годового хода температуры. Индексы континентальности давно стали классической мерой, используемой для классификации климатов различных регионов Земли. Значения индекса континентальности являются важнейшей характеристикой регионального климата для оценки

различий между морским и континентальным климатом. Однако в условиях меняющегося глобального климата с годами изменяется континентальность регионального климата в различных точках Земли. Поэтому индексы континентальности, вычисляемые погоди́чно, могут служить некоторой мерой изменений влияния океана на климат континентов.

Следует учитывать, что амплитуда годового хода может зависеть не только от интенсивности влияния океана, но и от парникового эффекта облачности, водяного пара и возрастающего парникового эффекта антропогенного происхождения. Амплитуда годового хода и индексы, вычисляемые на ее основе, не могут служить исчерпывающими показателями континентальности климата. Они должны дополняться индексами, вычисляемыми на основе запаздывания экстремумов годового хода температуры из-за большой тепловой инерции океана. Сдвиг экстремумов годового хода не имеет прямой зависимости от парникового эффекта, поэтому при любом количестве парниковых газов в атмосфере может являться характеристикой взаимодействия океана и атмосферы. В настоящей работе обращается внимание на то, что интенсивность этого взаимодействия может изменяться по годам, а параметры годового хода температуры, изменяющиеся вместе с интенсивностью взаимодействия, можно использовать в качестве косвенной оценки этой интенсивности. В задачах изучения и моделирования климата взаимодействие между океаном и атмосферой является одной из важнейших задач, которая плохо решается из-за недостаточного количества многолетних данных, прежде всего о состоянии океана на глубинах.

Если годовой ход описать синусоидой, то по ее фазе можно определить запаздывание годового хода, но во многих регионах Земли синусоида плохо описывает годовой ход, поэтому далее в работе использовался авторский показатель запаздывания фазы годового хода под названием индекс сезонной инерционности атмосферы, основанный на оценке сдвига годового хода температуры. Предложенный индекс позволяет на основе имеющихся данных обнаружить изменения интенсивности теплового взаимодействия атмосферы и океана, происходящие в условиях современного изменения климата.

При отсутствии инерционного воздействия океана на атмосферу наступление максимума годового хода температуры совпадало бы с моментом максимума инсоляции (конец июня), а минимум температуры, соответственно, совпадал бы с минимумом инсоляции (конец декабря). Тепловая инерционность самой атмосферы и суши пренебрежительно мала, по сравнению с инерционностью океана. Фактически под влиянием океана в годовом ходе температуры наблюдается запаздывание экстремумов так, как это показано на модельном примере двух синусоид на рис. 2.2.

Чем больше запаздывание, тем больше будет площадь на графике между кривыми t_1 и t_2 в переходные сезоны (рис. 2.2). При полном отсутствии инерции сезонный ход температуры был бы симметричен относительно осей, проходящих между декабрем-январем и июнем-июлем, январские температуры были бы равны декабрьским, февральские – ноябрьским и т.д. Но инерция смещает минимум температуры на январь-февраль, максимум – на июль-август.

Разность температур между средней температурой второго полугодия (июль–декабрь) и средней температурой первого полугодия (январь–июнь) дает интегральную оценку инерционности сезонного хода температуры за год. Инерционность сезонного хода температуры является следствием демпфирующего действия океана на изменения температуры на станции за весь год.

Индекс сезонной инерционности k предлагается вычислять для каждого года по формуле:

$$k = \frac{1}{2}(T_2 - T_1),$$

где T_1 – средняя температура воздуха первой половины года на станции; T_2 – среднемесячная температура второй половины года.

С уменьшением различий между полугодиями индекс k уменьшается, что соответствует уменьшению взаимодействия океана с атмосферой над ним, а при увеличении различий индекс показывает усиление взаимодействия океана с атмосферой.

Причины для изменения интенсивности взаимодействия могут быть разные, однако наиболее важной в данном случае представляется

роль толщины верхнего слоя перемешивания океана, теплоемкость которого и определяет количество тепла, которым обменивается атмосфера с подстилающим океаном. Не температура поверхности океана, а количество тепла во всем однородном слое океана, взаимодействующим с атмосферой, является важнейшей мерой для трансформации воздушной массы. Толщина верхнего однородного слоя перемешивания в климатическом плане может зависеть от некоторых глубинных долгопериодных океанических процессов и циркуляции в океане, для изучения многолетних особенностей, которых недостаточно, длительности и густоты имеющихся глубоководных измерений.

Сведения о том, что индекс инерционности не просто отражает локальные сезонные эффекты поля температуры, а связан с глобальными процессами на Земле, приведены в разделе 2.4. Там, в частности, показано, что после исключения векового линейного тренда из индекса k , его остатки хорошо коррелируют с вековыми изменениями скорости осевого вращения Земли, а изменения индекса с периодами около десяти и двадцати лет коррелируют с изменениями солнечной активности (числа Вольфа) и с орбитальными возмущениями Земли.

Сдвиг годового хода относительно инсоляции приводит к различиям температуры весны и осени. Предложенный авторский индекс прямым образом отражает температурные различия между осенью и весной, которые неизбежно возникают при сдвигах фаз их начала и окончания. Временной ряд индекса инерционности позволяет проследить изменения во времени интенсивности воздействия океана на атмосферу.

2.3. Инерционность годового хода температуры и изменения климата

Анализ инерционных особенностей сезонных изменений глобального климата проводился по среднемесячным обобщенным данным о температуре над континентами Северного полушария

за 1880–2003 гг. Данные подготовлены в Национальном климатическом центре США (NCDC). Источник данных: ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/land_meanT_C.all.

Выполнен анализ многолетних изменений показателя континентальности и индекса инерционности. На рис. 2.3 показан многолетний ход среднегодовой температуры воздуха над континентами и индекс инерционности сезонных изменений, рассчитанный по тем же данным.

Коэффициент корреляции между температурой и индексом $R = -0,70$ (вероятность случайности $P_{сл} < 5\%$). После исключения трендов из каждого ряда коэффициент корреляции между остатками остается отрицательным $R = -0,15$ и достоверным $P_{сл} < 5\%$. Зависимость прослеживается на вековом интервале и сохраняется на интервалах одного-двух десятилетий. В этом статистическом сопоставлении заложен важный физический смысл.

На территории России более надежные данные появились с 1936 года, когда существенно была расширена сеть метеорологических станций. По данным за 1936–2005 гг. построены графики индекса инерционности и обобщенной по станциям России среднегодовой температуры воздуха (рис. 2.4). Из рис. 2.3 и 2.4 видно, что известное глобальное потепление происходит на фоне уменьшения сезонной инерционности атмосферы, проявляющееся в том, что различия между температурой осени и весны с годами уменьшаются. Это означает, что за последние более 100 лет постепенно уменьшается влияние океана на континентальную атмосферу, климат становится более континентальным. Такое уменьшение возможно при постепенном изменении атмосферной циркуляции или при уменьшении толщины деятельного слоя океана, участвующего в теплообмене с атмосферой.

По эмпирическим данным более чем за 100 лет показано, что сезонные соотношения глобального климата, сложившиеся много десятилетий назад, постепенно изменяются. Это подтверждается различиями в трендах температуры разных месяцев (раздел 1.3).

Наиболее быстрые изменения климата происходили с середины 1970-х гг. Поэтому важно оценить изменения за последние десятилетия более тщательно. На рис. 2.5 показана карта изменений индекса инерционности за 1976–2005 гг.

За 30 лет заметно ослабло влияние океанов на атмосферу на обширной территории в Евразии севернее 45° с.ш. от Атлантики до меридиана 130° , исключая Таймыр. На описанной обширной территории индекс инерционности атмосферы имеет отрицательный тренд. Наиболее значительное ослабление на этой обширной территории произошло в Сибири (рис. 3.17). Восточнее 130° долготы, на Колыме и Чукотке, суша расположена севернее 60° , а тренды индекса там слабые положительные.

Южнее описанной территории (южнее географической широты $40-45^{\circ}$) в Евразии от Атлантики до Тихого океана тренды индекса преимущественно положительные, инерционность атмосферы в этих районах возрастает за последнее тридцатилетие. Можно предположить, что влияние океана на континентальную атмосферу здесь возрастает. Однако в таких низких широтах годовой ход слабый и сезонные сдвиги плохо выражены, поэтому к результатам, относящимся к низким широтам, следует относиться как к предварительным. В экваториальных и тропических широтах индекс инерционности вообще не следует применять, так как четкий годовой ход здесь отсутствует.

В Американском секторе широтное распределение трендов противоположное. Севернее $40-45^{\circ}$ тренды индекса положительные, а южнее – отрицательные. Отрицательные тренды индекса наблюдаются также на западе Аляски. Ослабло также влияние океанов на атмосферу на северо-западе Африки и в высокогорных районах Азии (рис. 2.5). Выявленные особенности базируются на статистически достоверных трендах ($P_{\text{сл}} < 5\%$) на станциях.

Расположение обширных районов в средних и высоких широтах с отрицательным трендом индекса в Евразии и районов с положительным трендом на аналогичных широтах Америки показывает, что за рассмотренные 30 лет влияние океана на атмосферу в средних и высоких широтах ослабевало в Евразии и усиливалось в Америке. Южнее $40-45^{\circ}$, наоборот, в Америке влияние океана на атмосферу ослабевало, а в Евразии – усиливалось.

На рис. 2.3, кроме уже описанных трендов, видны многолетние интервалы, когда индекс инерционности значительно отличался от

трендовых значений. Так, в 20–30-х гг. инерционность годового хода была заметно выше, а в последнее десятилетие – заметно ниже трендовых значений. Повышенная инерционность означает, что в 20–30-е гг., в «годы потепления Арктики», два десятка лет океан стабильно оказывал более сильное влияние на атмосферу, чем в другие годы. На рис. 2.6 показано изменение глобальной температуры воздуха над континентами и температуры поверхности Мирового океана. Усиленное воздействие океана на атмосферу в 20–30-е гг. происходило при одновременном повышении температуры океана, что не могло не отразиться на повышении температуры воздуха над континентами. Возможно, усиленная отдача тепла океаном тогда оказалось главной причиной первого глобального потепления.

В 40–60-е гг. температура поверхности океана чуть понизилась (рис. 2.6), а в последующие годы опять происходило медленное повышение температуры поверхности океана. Среднегодовая температура воздуха над континентами всегда была ниже температуры поверхности океана, но до 1980 года изменения их происходили с одинаковыми скоростями: роста – от начала века до 1939 года и падения – от 1940 по 1979 год. А далее тренд потепления континентального воздуха значительно превышал тренд температуры поверхности океана.

Резкое потепление климата, начиная с 1970-х и особенно с 1990-х гг., обычно объясняют антропогенным эффектом, который набирает угрожающую скорость. Далее будет показано, что существуют и другие факторы потепления климата, но атмосфера не нагреется, пока не нагреется океан (слой взаимодействия океана с атмосферой).

Учитывая результаты анализа об ослаблении аккумулирующего эффекта океана в эти годы, о скорости антропогенного потепления следует сказать особо. Наблюдаемые глобальные изменения климата действительно нельзя объяснить только адвекцией тепла из океана. Температура океана растет в эти годы не столь быстро и одновременно связь атмосферы с океаном ослабляется (ослабляется и инерционное влияние океана на атмосферу), значит, усиление адвекции в последние 20–30 лет происходит еще медленнее, чем растет температура поверхности океана, и не может служить источником стремительного повышения глобальной

температуры континентального воздуха. Темпы современного потепления глобального климата тоже нельзя объяснить только антропогенным влиянием. К тому же столь интенсивного роста концентрации парниковых газов антропогенного происхождения в последние два десятилетия не наблюдается. Опять же, учитывая результаты анализа об ослаблении аккумулирующего эффекта океана в эти годы, можно предположить, что усиленное потепление климата в последние два-три десятилетия произошло из-за накопленных ранее парниковых газов и других факторов на фоне ослабления аккумулирующей роли океана. Атмосфера получила большую свободу для проявления отепляющих факторов.

2.4. Инерционность и изменчивость климата

Если многолетние изменения тепловой инерционности атмосферы проявляются в параметрах годового хода, то можно ожидать проявления подобного влияния в межгодовой изменчивости. При ослаблении инерционности атмосфера должна получить большую свободу проявления изменчивости. Индекс инерционности (см. раздел 2.4) является показательным только в зоне выраженного годового хода, в связи с этим отбирались станции на географических широтах севернее 50°. Таким образом, для анализа было отобрано полторы тысячи станций. По каждой из них вычислены погодичные значения индекса инерционности и тренды индекса за 1920–2005 гг. За тот же период по каждой станции получены уравнения линейных трендов многолетнего хода температуры по каждому отдельному месяцу. Вычитание трендовых значений из исходных рядов температуры позволило получить многолетние ряды отклонений от трендов для изучения межгодовой изменчивости.

Значения в рядах отклонений могут быть положительными и отрицательными. Если существует рост межгодовой изменчивости, то должны возрастать по модулю как положительные, так и отрицательные значения рядов отклонений или могут возрастать значения только одного знака. Далее вычислялись отдельно тренды по положительным и по модулю отрицательных значений отклонений. Увеличение с

годами отклонений любого из знаков является характеристикой роста межгодовой изменчивости. Региональные особенности как межгодовой изменчивости, так и инерционности атмосферы различны на полушарии, они определяются циркуляционными особенностями сезона и региона. Важно понять, есть ли между знаком многолетнего тренда инерционности и знаком многолетнего тренда изменчивости на станции определенное соотношение. Далее по всем станциям оценивается количество (в %) совпадений знаков трендов в двух вариантах:

- уменьшение инерционности и рост изменчивости на станции;
- увеличение инерционности и падение изменчивости на станции.

Оба варианта соответствуют подтверждению гипотезы о зависимости межгодовой изменчивости климата от интенсивности взаимодействия атмосферы с океаном. Отсутствие в каком-либо регионе указанных совпадений следует рассматривать как отсутствие влияния инерционности атмосферы на межгодовую изменчивость климата.

На рис. 2.7 для января показаны регионы в Северном полушарии севернее 50° с.ш., в которых совпадение одного из двух указанных вариантов наблюдалось.

То есть на рис. 2.7 выделены регионы, на которых подтверждается гипотеза о связи межгодовой изменчивости климата с интенсивностью взаимодействия атмосферы с океаном. К таким регионам относятся все европейские страны, большая часть России и почти вся Канада. Калужская область попадает в регион, в котором подтверждается роль океана в формировании межгодовой изменчивости климата.

По другим месяцам пространственное распределение таких областей меняется в соответствии с изменениями характера атмосферной циркуляции и меняются количественные оценки, но общий вывод о связи межгодовой изменчивости климата с интенсивностью взаимодействия атмосферы с океаном сохраняется.

По всем месяцам произведены подсчеты количества станций, на которых подтверждается упомянутая гипотеза, сводные результаты показаны на рис. 2.8. Из рис. 2.8 видно, что при уменьшении индекса инерционности во все месяцы года на полушарии преобладает рост изменчивости температуры – около 65 % случаев. При увеличении

индекса инерционности во все месяцы преобладает падение изменчивости температуры – более 80 % случаев. Гипотеза в основном подтверждается.

Аналогичные подсчеты, выполненные за последние 30 лет, показали более тесную зависимость межгодовой изменчивости от инерционности атмосферы.

Из рис. 2.9 видно, что в последние три десятка лет при уменьшении индекса инерционности (вариант а) во все месяцы года наблюдался рост изменчивости температуры – в январе на 56 % станциях, а во все другие месяцы на 70–90 % станций Северного полушария, при увеличении индекса инерционности (вариант б) – в январе на 65 % станций, а во все другие месяцы – на 70–90 % станций Северного полушария. Последнее тридцатилетие отличается самыми низкими значениями индекса инерционности и большим количеством станций, на которых подтверждается связь межгодовой изменчивости с интенсивностью теплового взаимодействия атмосферы и океана.

Полученные результаты подтверждают, что в тех регионах, где в XX веке происходит ослабление взаимодействия атмосферы и океана, наблюдается рост изменчивости (рост модуля положительных и отрицательных отклонений температуры от тренда), а там, где взаимодействие атмосферы и океана усиливается, океан оказывает сглаживающее действие и наблюдается уменьшение межгодовой изменчивости температуры (уменьшение модуля положительных и отрицательных отклонений от тренда).

Итак, в результате исследований показана зависимость изменений глобального климата от интенсивности взаимодействия океана и атмосферы. Ослабление взаимодействия океана и атмосферы в последние десятилетия XX века позволило увидеть проблему накапливающихся антропогенных изменений климата и других факторов климата.

Впервые обращено внимание на изменение инерционных свойств климатической системы и последующие изменения климата. Получено косвенное подтверждение океанической и парниковой составляющих в изменениях глобального климата. В последние десятилетия произошло наложение антропогенного фактора потепления и

других факторов на временное ослабление демпфирующего эффекта океана – глобальное потепление ускорилося. Если в последующие годы связь океана с континентальной атмосферой будет усиливаться, то скорость глобального потепления может существенно замедлиться.

Усиление изменчивости и экстремальности регионального климата последних десятилетий совпадает по времени с ослаблением в тех же регионах взаимодействия атмосферы с океаном и уменьшением инерционности сезонных преобразований.

2.5. Изменение инерционности климатической системы при изменении скорости осевого вращения Земли

Изменение глубинных долгопериодных океанических процессов и океанической циркуляции неизбежно приводит к переносу массы в меридиональном направлении и к изменению момента импульса осевого вращения Земли. Равно и наоборот, изменения скорости вращения Земли под влиянием внешних факторов могут привести к изменению циркуляции вод океана и атмосферной циркуляции. Известно, что продолжительность суток (скорость осевого вращения Земли) может изменяться только на доли секунды, но из-за огромной массы Земли при этом момент ее вращения изменяется настолько, что для сохранения общего момента вращения Земли, включая атмосферу, должны возникнуть компенсационные движения в атмосфере, сравнимые с реально наблюдаемыми воздушными потоками. При этом можно предположить, что океанические течения тоже будут участвовать в компенсационных процессах с изменением горизонтальной и вертикальной циркуляции. Результатом таких возмущений в океане может стать изменение толщины слоя, участвующего в теплообмене с атмосферой, и изменение индекса инерционности атмосферы.

Корреляцию между индексом инерционности атмосферы и скоростью вращения Земли можно проследить на протяжении XX века. На рис. 2.10 показан индекс инерционности ($k\text{-tr}$) после исключения

линейного тренда и относительная скорость вращения Земли (W), представленная с обратным знаком для наглядности сопоставления. Значения индекса сглажены по скользящим пятилетиям.

Рисунок показывает хорошее согласие долгопериодных изменений индекса и скорости вращения Земли (околовековой период). Коэффициент корреляции кривых, приведенных на графике – $R = 0,50$ ($P_{\text{сл}} < 5\%$). С учетом обратного знака это означает, что более высокой скорости вращения Земли соответствует низкое значение индекса и ослабленное взаимодействие океана и атмосферы. Замедленной скорости вращения Земли соответствует высокое значение индекса и более существенное взаимодействие океана и атмосферы.

Несогласованные изменения кривых заметны в 1906–1908 и в 1968–1975 гг. Это показывает, что зависимости индекса и глубинных процессов в океане непростые. Однако все же высокая корреляция $R = 0,50$ со столь интегральным показателем земных процессов, как скорость вращения Земли, говорит о том, что предложенный индекс, бесспорно, отражает некоторые глубинные процессы в климатической системе и может использоваться для дальнейшего анализа.

2.6. Углекислый газ в океане

Содержание углерода в океане в 50 раз превышает его содержание в атмосфере, а количество нового углерода, поступившего в атмосферу с начала промышленной революции, меньше количества углерода, проходящего через морскую экосистему в течение пяти лет. Растворимость CO_2 в холодной воде выше, чем в теплой, поэтому основное содержание CO_2 заключено в холодных глубинных водах. В атмосфере количество CO_2 увеличивается из-за сжигания топлива, но 48 % из вновь поступившего количества CO_2 растворяется в океане [111].

Объем растворенного в океане CO_2 зависит от вертикального переноса его глубинной циркуляцией и от температуры глубинной воды. Усиление вентиляции глубинных слоев и их нагрев могут привести к

усилению потоков CO_2 в атмосферу и усилить парниковый эффект. Возможности нагретого океана по выбросам CO_2 в атмосферу превосходят антропогенные выбросы и заслуживают пристального изучения.

2.7. Универсальные методические замечания к статистическому анализу

Современные компьютерные средства и большое количество пакетов статистических программ позволяют легко обработать любой временной ряд и описать его статистическую структуру или обработать совместно несколько рядов и описать парные корреляции или множественную зависимость одного из рядов от всех остальных. Можно выполнить спектральный анализ и сделать выводы о наличии или отсутствии периодичностей. Можно ввести поле данных и вычислить много параметров статистической структуры поля метеорологических величин и т.д. Иногда такими способами удается найти некоторые закономерности, но, как правило, их трудно интерпретировать. Если не известно, что искали, то будет – не известно, что получили.

Методы постоянно развиваются. Так, например, на смену спектральному анализу пришел вейвлет-анализ, когда стало ясно, что отсутствие периодичностей во временном ряде на некотором длительном интервале не означает, что их нет на отдельных участках этого ряда. В результате закономерности стали обнаруживать там, где раньше со всей убедительностью на основе строгих критериев доказывали их отсутствие. Таких примеров, касающихся не только поиска периодичностей, много. Нельзя сказать, что спектральный анализ давал неправильный результат – неправильно был поставлен эксперимент.

Другой пример. Некоторое время назад можно было встретить публикации, в которых по данным временных рядов за 1950–1990-е гг. доказывалось отсутствие потепления климата, хотя, по данным наблюдений, с начала века прослеживалось явное потепление. Интервал 1950–1990 гг. был выбран из соображений статистической надежности результатов. До 1950 года станций наблюдений было недостаточно

для надежного пространственного охвата Земли, ранние данные отбросили. А после 1990-х гг. просто еще не было данных. 1950-е гг. – это окончание первого глобального потепления, годы были сравнительно теплыми, потом последовало временное похолодание, а с 1970-х гг. началось второе глобальное потепление. 1990-е гг. были тоже относительно теплыми, так получилось, что на интервале 1950–1990 гг. тренды оказались почти нулевыми. Последовал вывод об отсутствии изменений климата. Теперь это кажется странным, а тогда из-за неправильного планирования эксперимента был получен строгий, но не имеющий физического смысла и ошибочный результат.

Правильное планирование статистического эксперимента – залог успеха в доказательстве или в опровержении гипотезы, под которую строился эксперимент. Это трудный путь. Во-первых, необходимо обладать большими знаниями в науках о Земле и в смежных науках, а также обладать научной фантазией для выдвижения гипотезы. Во-вторых, необходимо знать и глубоко понимать существующие методы статистического анализа, чтобы на их основе предложить свой метод. В-третьих, под каждый такой специальный статистический эксперимент необходимо разрабатывать специальные программные средства для работы на компьютере.

Неправильно считать статистические методы анализа самостоятельным инструментом исследования физических процессов на Земле (в применении к задачам климатологии). Статистический анализ – это лишь инструмент для проверки физических гипотез о процессах на Земле и в космосе в применении к нашей задаче. Еще менее полезным в познании природы является бесцельное исследование статистической структуры данных наблюдений. Но в инженерных задачах знание статистической структуры необходимо.

В вопросе о причинах изменений (колебаний) климата важное место занимают статистические исследования взаимодействий отдельных элементов климатической системы между собой и с внешними факторами. Простые исследования корреляций не всегда дают окончательный результат.

Если известно, что есть предиктор, который содержит вынуждающие колебания, и есть предиктант, в котором предполагается най-

ти вынужденные колебания, то корреляционный анализ для этого подходит. Если предиктор своими вынуждающими колебаниями каждый раз запускает серии свободных колебаний у предиктанта, тогда корреляционный анализ покажет отсутствие влияния предиктора на предиктант – это будет ошибкой при всей строгости применения статистических критериев.

Поиск частот собственных колебаний спектральными методами не приведет к успеху. Необходимо понимать, что каждая волна вынуждающих колебаний предиктора запускает серию собственных колебаний в предиктанте с новой фазой в условиях, когда еще не все собственные колебания от предыдущей волны затухли. Возникают наложения, суперпозиция, интерференция, биения и т.д.

В этой ситуации при поиске закономерностей необходимо искать период вынуждающих долгопериодных колебаний и специальными методами выделять и изучать возникающие собственные колебания, не испорченные наложением.

Понимание физических процессов или удачная гипотеза позволяют правильно выбрать специальный метод анализа и правильно организовать статистический эксперимент. В этом залог успеха. «Прочесывание» временных рядов классическими методами статистического анализа позволяет только доказать, что климатическая система либо одна из сложнейших систем, не поддающаяся описанию, либо это случайная система, не имеющая закономерностей. Второе доказать легче, но будет ли такой вывод правильным?

Приведенные методические рассуждения о методах исследования взаимодействия океана и атмосферы справедливы и для всех других случаев планирования статистического анализа. Все авторские результаты, представленные в настоящей монографии и в других работах автора, получены в результате статистических экспериментов по проверке физических гипотез. В главе 6 на основе знания закономерностей формирования вынужденных и свободных колебаний в климатической системе предложен метод выделения скрытых ритмов атмосферы, который составил основу статистической модели климата для прогноза его колебаний на два десятилетия. Оценки точности прогнозов климата показали работоспособность такого подхода.

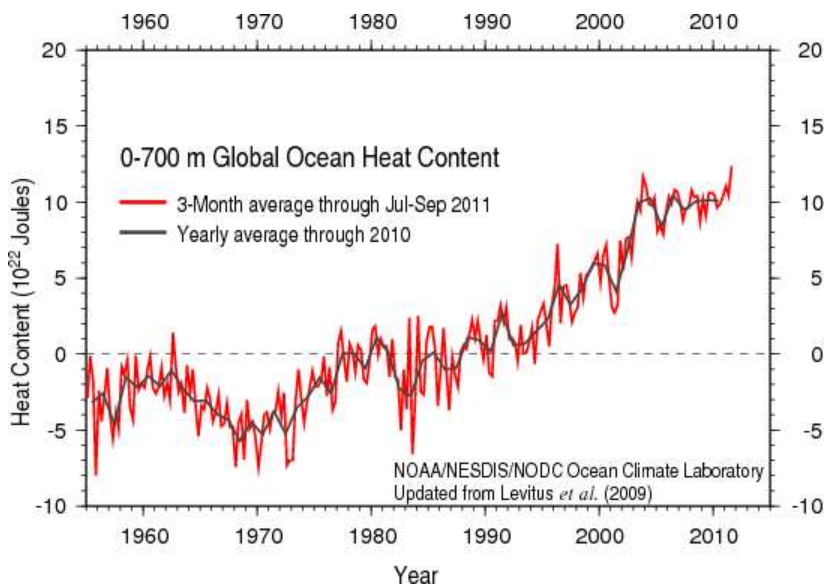


Рис. 2.1. Теплосодержание верхнего 700-метрового слоя Мирового океана http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/

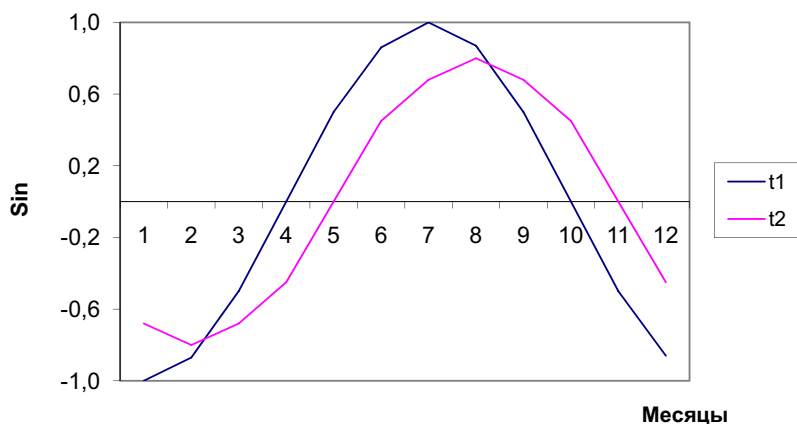


Рис. 2.2. Демонстрация запаздывания сезонного хода температуры воздуха в умеренно-морском климате (модель)

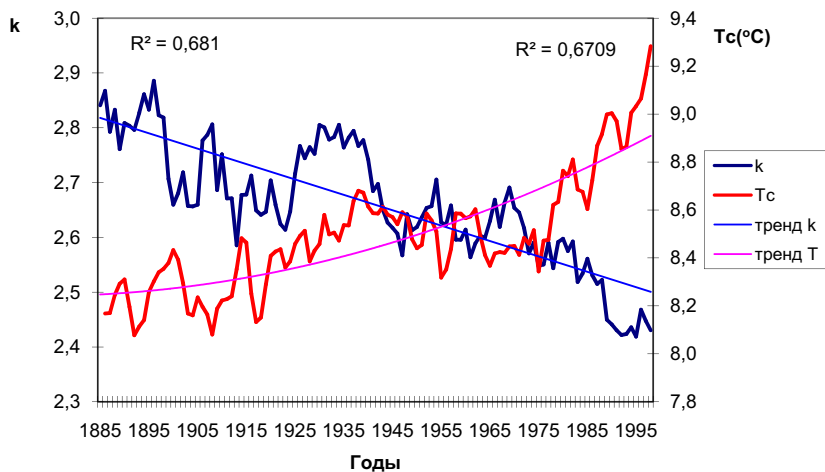


Рис. 2.3. Среднегодовая температура воздуха над континентами Северного полушария (T_c) и индекс сезонной инерционности атмосферы (k), скользящие средние по трехлетиям

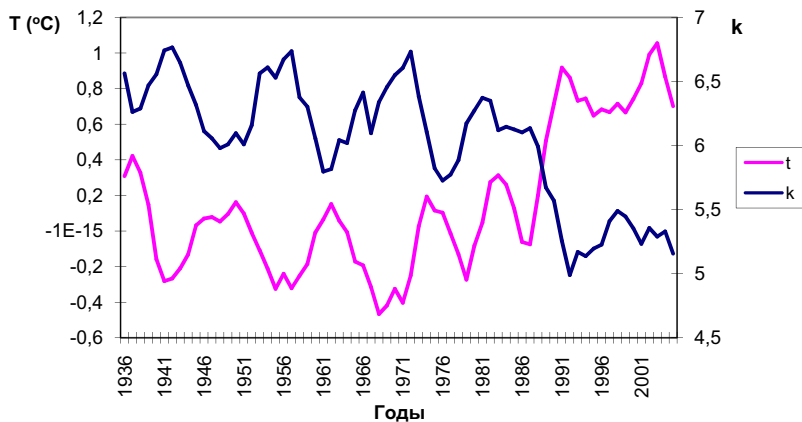


Рис. 2.4. Индекс инерционности и среднегодовая температура воздуха на территории России. Коэффициент корреляции – $-0,86$

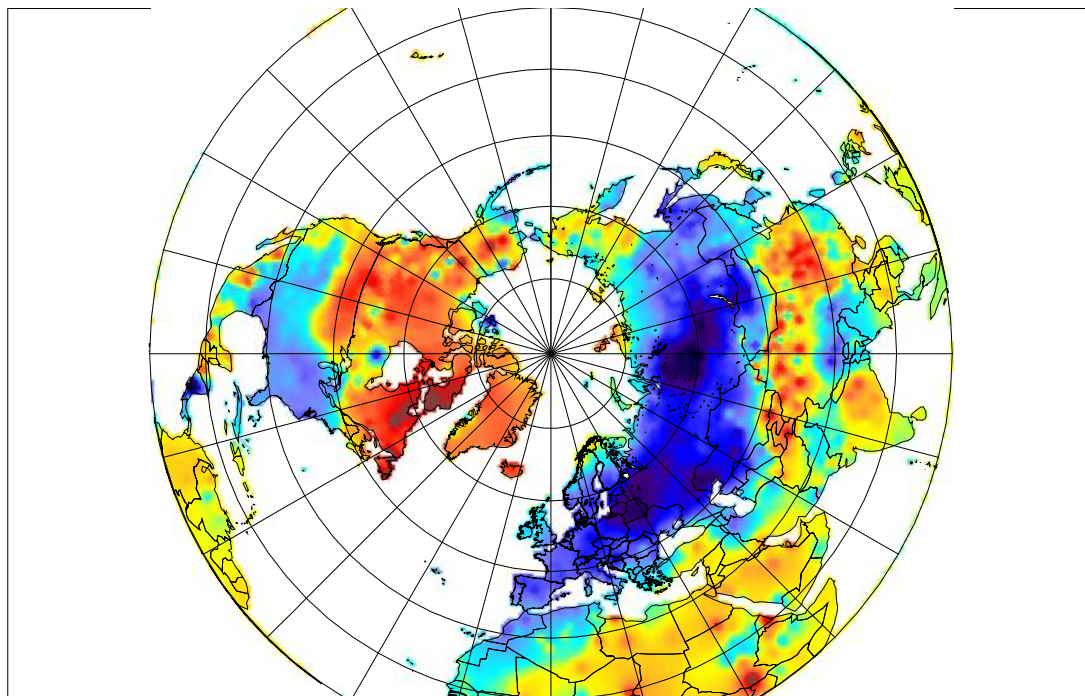


Рис. 2.5. Тренды индекса сезонной инерционности атмосферы за 1976–2005 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет)

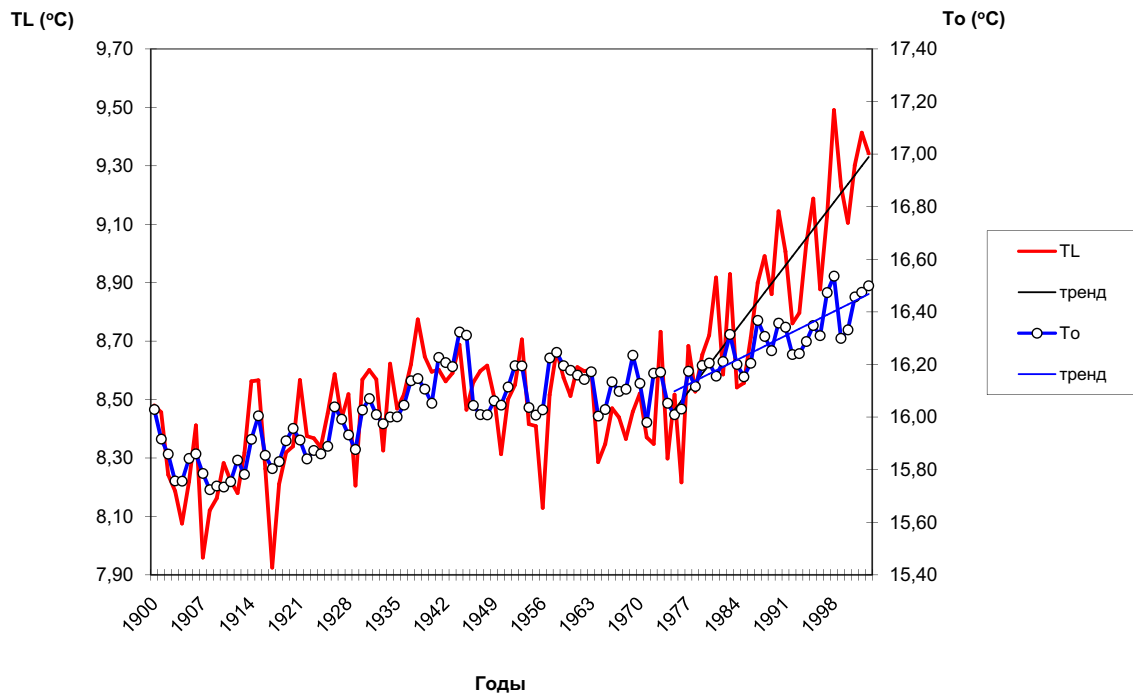


Рис. 2.6. Глобальная температура над континентами (TL) и температура поверхности Мирового океана (To)

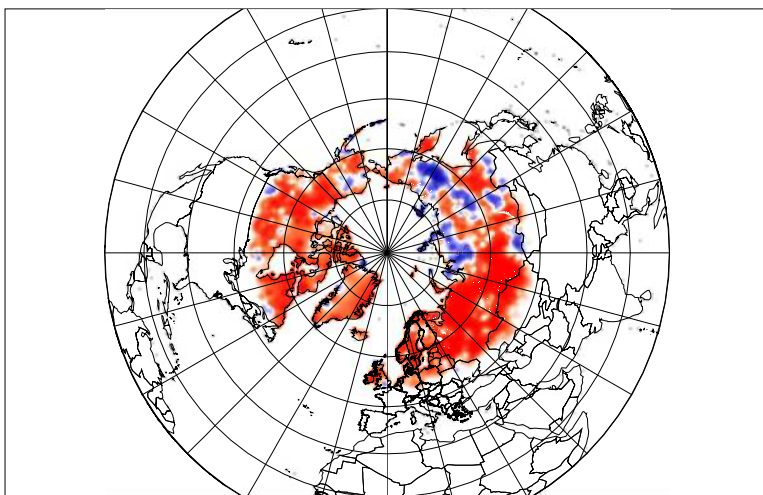


Рис. 2.7. Регионы, в которых обнаружена зависимость величины межгодовой изменчивости температуры от изменения интенсивности взаимодействия атмосферы с океаном (красный – зависимость есть, синий – зависимости нет, белый – интенсивность взаимодействия не изменялась). Январь

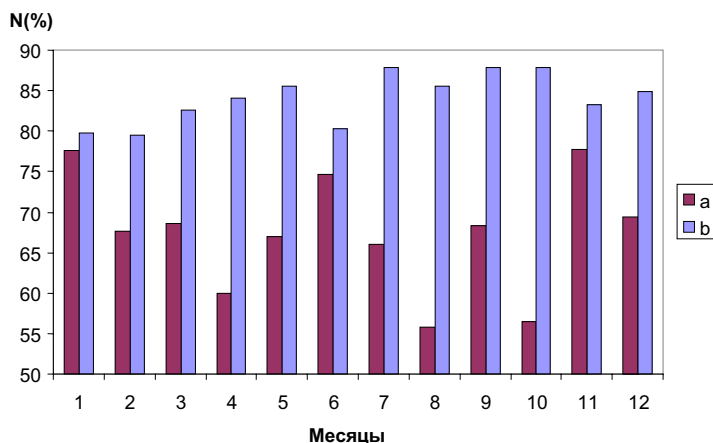


Рис. 2.8. Количество станций (%), на которых по данным за 1920–2005 гг. подтверждается гипотеза в двух вариантах: а) уменьшение инерционности и рост изменчивости; б) увеличение инерционности и падение изменчивости

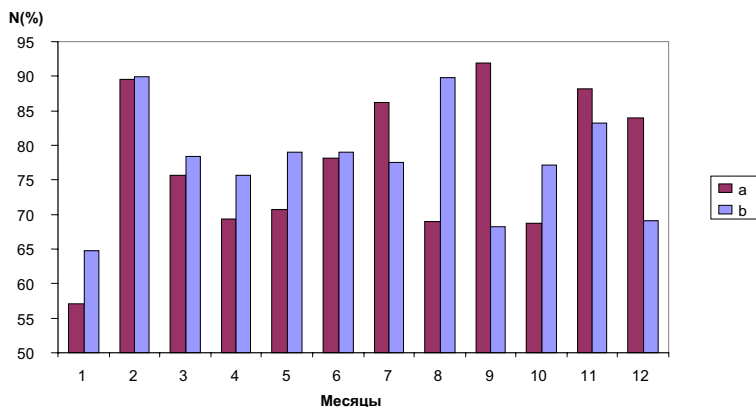


Рис. 2.9. Количество станций (%), на которых по данным за 1976–2005 гг. подтверждается гипотеза в двух вариантах: а) уменьшение инерционности и рост изменчивости; б) увеличение инерционности и падение изменчивости

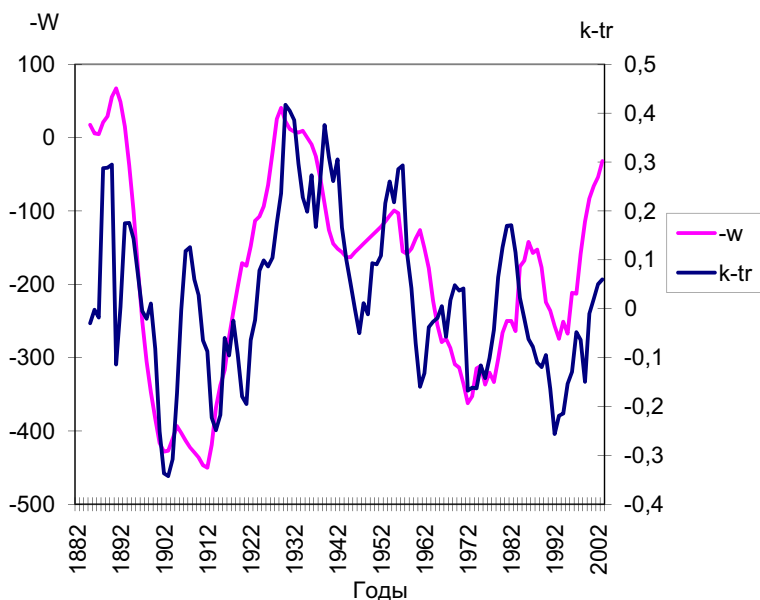


Рис. 2.10. Индекс инерционности без тренда и скорость осевого вращения W Земли с обратным знаком

Глава 3. Космические основы формирования и колебаний климата планеты

В настоящей главе кроме вопросов климатологии затрагиваются вопросы, связанные с астрономией, физикой космоса и солнечно-земной физикой, поэтому в некоторые разделы вставлены необходимые краткие сведения из перечисленных смежных наук.

3.1. Солнечная радиация – основа формирования климата

Климат Земли является, прежде всего, результатом воздействия солнечной энергии при существующих астродинамических параметрах Земли. Земля совершает сложные движения в космосе, из которых наиболее важное погодно-климатическое значение имеют годовое обращение вокруг Солнца (орбитальное вращение), суточное вращение вокруг оси (осевое вращение) и наклон оси к эклиптике. Источником энергии, формирующей климат Земли, является Солнце. Количество приходящей к Земле солнечной лучистой энергии определяется количеством излучаемой Солнцем энергии и расстоянием от Солнца до Земли. Поэтому первыми двумя условиями постоянства климата является сохранение светимости Солнца и параметров орбиты Земли. На самом деле ни то, ни другое не остается строго постоянным, наблюдаются малые вариации.

Однако светимость Солнца характеризуется, так называемой, солнечной постоянной. Солнечная постоянная – количество лучистой энергии Солнца, поступающей за 1 мин на 1 см^2 площади, перпендикулярной к солнечным лучам и находящейся вне земной атмосферы на расстоянии одной астрономической единицы (среднее расстояние Земли от Солнца) [35, 51].

Современными исследованиями с помощью спутников и ракет установлено значение S_0 , равное 1367 Вт/м^2 с ошибкой $\pm 0,3 \%$, среднее расстояние между Землей и Солнцем в этом случае определено как $149,6 \times 10^6 \text{ км}$. Если учитывать изменения солнечной постоянной в связи с изменением расстояния между Землей и Солнцем, то при среднегодовом значении $1,37 \text{ кВт/м}^2$ в январе она будет равна $1,41 \text{ кВт/м}^2$, а в июне – $1,34 \text{ кВт/м}^2$, следовательно, Северное полушарие за летний день получает на границе атмосферы несколько меньше радиации, чем Южное полушарие за свой летний день.

В начале 1980-х гг. была обнаружена переменность солнечной постоянной с амплитудой $0,1\text{--}0,2 \%$, связанная с 11-летним солнечным циклом. Уменьшение солнечной постоянной связано с появлением на Солнце очень больших групп пятен, а слабое увеличение – с солнечными факелами. При высокой солнечной активности на Солнце увеличивается число пятен (солнечные пятна – темные образования), от площади которых в некоторой мере зависит солнечная постоянная. Появление на диске Солнца пятен и факелов объясняет лишь $50\text{--}70 \%$ всех наблюдаемых вариаций солнечной постоянной. Возможными причинами циклической переменности солнечной постоянной могут быть также изменения диаметра Солнца. [44, 50].

По данным [1], изменения солнечной постоянной составляют $0,07 \%$.

Число солнечных пятен характеризуется числами Вольфа, которые отражают большой комплекс различных явлений на Солнце под общим названием солнечная активность. В [1] приведен график изменения чисел Вольфа и солнечной постоянной за три 11-летних солнечных цикла (рис. 3.1), который демонстрирует хорошее их согласие.

Аналогичные результаты получены в [100].

Вопрос о влиянии столь малых вариаций солнечной постоянной остается дискуссионным и сводится к вопросу о чувствительности климатической системы к таким вариациям.

Главным космическим фактором климата Земли является относительное постоянство лучистой энергии Солнца, а вариации количества

солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, могут быть одной из причин колебаний климата. Вопросы влияния солнечной активности на климат наиболее подробно рассмотрены в монографии [45].

Не менее важную роль в вариациях климата играет количество поглощенной радиации поверхностью Земли. С астрономической точки зрения поглощение Землей пришедшей солнечной энергии определяется прежде всего углом падения солнечных лучей на поверхность Земли, который зависит от угла наклона Земной оси к эклиптике и географической широты местности.

Местность получает от Солнца тепло:

$$I = I_0 \cos Z,$$

где I_0 – количество тепла, поступающего от Солнца на перпендикулярную к лучам поверхность; Z – угол падения солнечных лучей на поверхность Земли, он равен зенитному расстоянию Солнца.

В метеорологии вместо зенитного расстояния принято использовать характеристику высоты Солнца над горизонтом h_c . Поток солнечной радиации на единичную площадку внешней границы атмосферы рассчитывают с учетом изменения расстояния от Солнца до Земли при ее движении по эллиптической орбите:

$$I = (I_0 \sin h_c) / (r/r_0)^2,$$

где r_0 – среднее, а r – текущее расстояние от Земли до Солнца [70].

Различия в угле падения солнечных лучей на разных географических широтах формируют зональность климата. А изменение угла падения солнечных лучей в течение года определяет смену времен года. В период между днем весеннего и днем осеннего равноденствия Северный полюс Земли обращен к Солнцу, а Солнце находится в северной полусфере от экваториальной плоскости. Склонение Солнца при этом положительно, дневной путь его над горизонтом Северного полушария в это полугодие продолжителен и высок, поэтому обогрев этого полушария значителен. Так формируется теплое полугодие в Северном полушарии. В зоне вокруг Северного полюса Солнце

не заходит (полярный день), а в зоне вокруг Южного полюса Солнце в это время не восходит (полярная ночь). В это же время (между днями весеннего и осеннего равноденствий) в Южном полушарии формируется холодное полугодие. Так как там в это время дневной путь Солнца над горизонтом непродолжителен и невысок, то обогрев Южного полушария слабый.

В противоположном секторе земной орбиты в период между днями осеннего и весеннего равноденствий Южный полюс Земли повернут к Солнцу, поэтому там в это время наступает теплое полугодие, а в Северном полушарии, наоборот, холодное. В моменты равноденствий инсоляция максимальна на экваторе и равна нулю на полюсах.

В результате взаимодействия Земли с Луной и планетами возникают вариации в параметрах орбитального движения Земли и наклона земной оси. При этом изменение расстояния от Солнца до Земли сопровождается изменением притока солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы, изменение наклона Земной оси изменяет условия поглощения солнечной радиации, а неравномерность движения Земли по орбите изменяет длительность сезонов и, соответственно, изменяет суммарный за год приток солнечного тепла в климатическую систему. Астродинамические условия – основа формирования радиационных составляющих климата планеты. Предстоит выяснить, в какой мере перечисленные последствия астрономических вариаций могут быть заметными в колебаниях радиационных факторов климата.

Вторым важнейшим космическим фактором климата является угол наклона земной оси к эклиптике, а вариации этого угла могут быть одной из причин вариаций климата.

Вариации в параметрах орбитального движения Земли и наклона земной оси могут сопровождаться не только радиационными, но и динамическими возмущениями во всех оболочках Земли.

3.2. Сведения о климатогенных возмущениях в параметрах движения системы Земля–Луна

Земля всегда испытывает переменные повторяющиеся гравитационные воздействия со стороны других тел Солнечной системы. В результате таких воздействий составляющие движения Земли никогда не остаются строго постоянными – всегда существуют возмущения траектории движения Земли и наклона ее оси. Ранее эти параметры были указаны как важнейшие показатели формирования климата и его вариаций. Вариации траектории орбитального движения Земли и наклона ее оси сопровождаются ускорением или замедлением движения. Возникающие при этом силы в разных оболочках Земли инициируют движения. Подвижки в недрах Земли способны активизировать землетрясения и дегазацию с дополнительными выбросами парниковых газов и аэрозольных частиц. Движения в океане и атмосфере вызывают изменения в океанической и атмосферной циркуляции. А изменение циркуляции – это нарушение баланса в теплообмене между океаном и атмосферой, это адвекция и нарушение теплообмена в атмосфере между высокими и низкими широтами.

Возмущения астродинамических величин могут сильно отличаться по величине и иметь разный временной масштаб от нескольких дней до многих тысячелетий. Эти возмущения возникают при взаимодействии Земли с другими планетами и с Луной, а также изменением диссимметрии всей Солнечной системы. Некоторые сведения о таких возмущениях приведены далее.

Земля третья от Солнца планета Солнечной системы. Она принадлежит к группе планет, в которую входят также Меркурий, Венера и Марс. У Земли имеется единственный спутник – Луна. Земля обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите (с возмущениями) и на меньшем расстоянии от него бывает 1–5 января, а на наибольшем – 1–5 июля. Скорость движения Земли по орбите изменяется в течение года: максимальная скорость – в начале января, а минимальная – в начале июля. Период обращения Земли вокруг Солнца равен звездному

году ($T = 365$ сут 6 ч 9 мин 10 с). Плоскость земного экватора наклонена под углом $\sim 23^\circ 26'$ к плоскости земной орбиты (наклон земной оси составляет $\sim 66^\circ 34'$). Орбита вращения Земли вокруг Солнца представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого расположено Солнце.

По своим астрофизическим величинам Земля занимает скромное положение в бесконечности космоса и подчиняется общим законам космических взаимодействий. В течение времени астродинамические и астрофизические величины Земли, определяющие климат Земли, не остаются постоянными.

Из-за гравитационного воздействия на Землю Луны и Солнца плоскость земного экватора при почти неизменном наклонении медленно поворачивается с востока к западу, и поэтому точки весеннего и осеннего равноденствия, расположенные на линии узлов небесного экватора, ежегодно смещаются по эклиптике на $50,27''$ в том же направлении, т.е. навстречу видимому годовому движению Солнца. Ось вращения Земли, перпендикулярная плоскости экватора, поворачивается за год на те же $50,27''$, описывая в пространстве коническую поверхность вокруг оси эклиптики, подобно повороту оси вращающегося волчка. Такой поворот называют прецессией. Один оборот вокруг оси эклиптики земная ось совершает за период 25 800 лет [18], называемый периодом прецессии.

Здесь слово «почти» подчеркивает наличие вариаций в наклоне оси. Так как положение Луны и Солнца относительно земного экватора постоянно изменяется, то претерпевает соответствующие изменения и момент гравитационных сил, приложенных к Земле. Чем больше склонение притягивающего тела, тем больше гравитационный момент. Если и Луна, и Солнце одновременно окажутся в экваториальной плоскости, то этот момент равен нулю. Непостоянство момента сил лунного и солнечного притяжений вызывает колебания земной оси, называемые нутацией. Период этих колебаний равен периоду обращения лунных узлов 18,6 года [18].

Лунные приливы

Наибольшие возмущения в движении Земли создает Луна. Движение Земли по орбите происходит совместно и во взаимодействии с Луной, при этом они вращаются вокруг общего центра масс системы Земля–Луна. Положение оси вращения Земли и ее наклон имеют важнейшее значение для формирования атмосферной и океанической циркуляции. Под действием Луны ось вращения Земли никогда не проходит через центр Земли и может смещаться относительно центра в сторону Луны примерно на 4670 км. [78, 79]. В результате движения Земли вокруг центра масс системы Земля–Луна возникает центробежная сила, которая действует на все земные частицы. Совместное действие центробежной силы и силы притяжения Луны создает приливную силу и лунные приливы в твердом теле Земли, в океане и в атмосфере. Величина приливной силы есть функция склонения и геоцентрического расстояния Луны. Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18,61 лет от 29° до 18° из-за прецессии оси (регрессии узлов) лунной орбиты [78, 79].

Лунные вариации скорости осевого вращения Земли

Лунный путь наклонен к эклиптике под углом $5^\circ 09'$ и пересекается с нею в двух диаметрально противоположных точках, называемых лунными узлами. Перемещение лунных узлов – результат вращения плоскости лунной орбиты с периодом 18,6 года. В восходящем лунном узле Луна переходит к северу от эклиптики, а в нисходящем узле – к югу от нее. Если восходящий лунный узел совпадает с точкой весеннего равноденствия, а нисходящий узел – с точкой осеннего равноденствия, то на протяжении месяца склонение Луны изменяется в пределах $\pm 28^\circ 35'$ ($23^\circ 26' + 5^\circ 09'$). Если же с точкой весеннего равноденствия совпадает нисходящий узел, то склонение Луны изменяется в пределах $\pm 18^\circ 17'$ ($23^\circ 26' - 5^\circ 09'$) [39].

Луна совершает полный оборот вокруг Земли за 27,32 суток, при этом склонение ее изменяется в указанных пределах. Лунные приливы приводят к растяжению всех оболочек Земли (литосферы, океана, атмосферы) в сторону Луны на географической широте,

равной склонению Луны и в диаметрально противоположную сторону. Амплитуда изменений склонения Луны изменяется с периодом 18,6 года. Растяжение Земли означает удаление некоторой массы от оси вращения Земли, момент инерции увеличивается, при этом неизбежно происходит замедление вращения Земли вокруг своей оси, так как произведение момента инерции на угловую скорость – величина постоянная. Приливообразующая сила растягивает Землю вдоль прямой Луна–Земля. Величина растяжения Земли увеличивается, когда линия растяжения совпадает с плоскостью экватора, и уменьшается, когда линия растяжения отклоняется от плоскости экватора.

За один оборот Луна проходит от южного максимума склонения через экватор к северному максимуму и обратно. В дни, когда Луна проектируется на экватор (склонение около нуля), скорость вращения Земли минимальная, а в дни как южного, так и северного максимума скорость максимальная за оборот. То есть за один оборот Луны наблюдаются два максимума и два минимума скорости вращения Земли. Наибольшие вариации скорости вращения Земли наблюдаются в годы с большими амплитудами склонения Луны.

Полюсный прилив

Земля имеет форму эллипсоида вращения со сжатием в направлении север–юг (экваториальный радиус Земли превышает полярный на 21 км). Еще Эйлером было показано, что сжатие Земли является причиной возникновения некоторых небольших колебаний мгновенной оси ее вращения (нута́ция) и движения полюсов. Такое движение полюсов называют свободной нутацией, или чандлеровским движением полюсов. Нутация создает силы деформации Земли, которые вызывают полюсный прилив (к приливообразующей силе Луны не имеет отношения). Свободная нутация принципиально отличается от лунно-солнечной нутации и прецессии. При свободной нутации ось суточного вращения фиксирована в пространстве, но колеблется в теле Земли, а при лунно-солнечной нутации и прецессии ось вращения фиксирована в теле Земли, но движется в пространстве среди звезд [78].

С полюсным приливом связаны небольшие, но глобальные изменения океанских течений [53].

Помимо чандлеровского движения полюсов существует еще и вынужденное движение полюсов с периодом один год как результат перемещения массы вместе с сезонным перемещением воздушных и водных масс по земной поверхности. Сложение чандлеровского и годового движений порождает биения, в результате которых радиус траектории движения полюса меняется от максимального до минимального с периодом примерно 6 лет [79].

3.3. Лунные возмущения вращения Земли

Скорость вращения Земли

На основе анализа данных продемонстрируем влияние вариаций движения Луны на скорость вращения Земли. Анализировалась продолжительность суток LOD при различных значениях склонения Луны. Привлекались ежедневные данные о продолжительности суток (единица измерений 0,001 с) за 1962–2009 гг. (LOD http://data.iers.org/products/213/14444/orig/eopc04_08.62-now) и сведения о склонении Луны S_m [5]. Продолжительность суток – это величина производная от скорости вращения Земли. При увеличении скорости вращения продолжительность суток уменьшается, а при уменьшении скорости – продолжительность увеличивается.

Анализ проводился методом наложения эпох [69] относительно реперных дат t_0 . В качестве каждой даты t_0 выбиралась дата достижения Луной максимального склонения за месяц. Список реперных дат составлялся на основе анализа ежедневных данных о склонении Луны. Анализировался каждый оборот Луны. В каждом году было определено по тринадцать дат. За все годы было получено 576 дат t_0 . Наложение эпох проводилось в интервале 27 суток от t_0 до $t_0 + 26$.

Анализировались ежедневные значения аномалий LOD (отклонения от годового хода за 1962–2010 годы). Известно, что уменьшение продолжительности суток должно происходить как при большом северном склонении Луны, так и при большом южном склонении (южное склонение задано со знаком минус). Наибольшая продолжительность суток должна быть в дни прохождения Луной плоскости земного экватора как при ее движении с севера на юг, так и при движении с юга на север. Для плавного обращения отрицательных значений склонений в положительные значения в анализе использовался ряд квадратов склонения Луны S_m^2 .

Суть метода наложенных эпох заключается в получении средних многолетних значений анализируемой величины по всем датам t_0 , и аналогично – средних значений отдельно по каждой дате от $t_0 + 1$ до $t_0 + 26$ за все годы. Для каждого дня наложения эпох осреднение проводилось по 576 случаям, подобранным за 1962–2010 гг. Так были получены значения МНЭ аномалий продолжительности суток ΔLOD и для сравнения – значения МНЭ квадрата склонения Луны S_m^2 по датам $t_0 \dots t_0 + 26$. Под аномалиями понимаются отклонения продолжительности суток от средних за 1962–2010 гг. значений продолжительности суток на каждый день года. Полученные значения после наложения эпох позволяют последовательно проследить изменения продолжительности суток начиная с даты максимального северного склонения Луны в течение всех последующих 27 суток обращения Луны вокруг Земли. Этот период перекрывает все стадии изменения склонения Луны.

На рис. 3.2 приведены значения ΔLOD , полученные в результате наложения эпох, и значения S_m^2 по суткам.

Наименьшая продолжительность суток наблюдается в 1-й, 27-й и 14–15-й дни оборота Луны вокруг Земли, если за начало оборота принять дату максимального северного склонения Луны. Амплитуда изменения продолжительности суток под влиянием изменения склонения Луны составляла 0,001 секунды. В первый и 27-й дни было максимальное северное склонение Луны, а в 14–15-е дни – максимальное южное склонение Луны.

Сравнение дисперсий показало, что изменения склонения Луны создают вариации в аномалиях продолжительности суток, которые составляют около 83 % общей дисперсии аномалий продолжительности суток.

Коэффициент корреляции между продолжительностью суток и квадратом склонения Луны в МНЭ оказался $r = -0,994$. Столь высокая корреляция показывает, что метод наложения эпох исключил все вариации продолжительности суток, не связанные с изменением склонения Луны, и что изменение склонения Луны приводит к изменениям скорости вращения Земли и продолжительности суток.

В результате анализа еще раз подтверждено, что изменение склонения Луны при ее движении вокруг Земли сопровождается неслучайными возмущениями скорости вращения Земли дважды за 27 суток. Вклад лунного эффекта в общую дисперсию аномалий продолжительности суток составляет около 83 %.

Изменения амплитуды лунного склонения и продолжительности суток

Уже упоминалось, что амплитуда изменений склонения Луны возрастает до $\sim 56^\circ$ и убывает до $\sim 36^\circ$ с периодом 18,6 лет. Что при этом происходит? Вычислим коэффициент корреляции между суточными значениями аномалий продолжительности суток ΔLOD и квадратом склонения луны S_m^2 по отдельным годам и нанесем их на график (рис. 3.3). Там же показаны максимальные значения склонения Луны по годам. Коэффициенты корреляции в разные годы существенно различны. Их погодичные изменения с периодом около 19 лет привязаны к изменениям максимальной величины склонения Луны. Наилучшая отрицательная корреляция между S_m^2 и ΔLOD наблюдается в годы больших колебаний склонения ($\pm 28^\circ$) с коэффициентом около -0,6. При малой амплитуде склонения Луны ($\pm 18^\circ$) корреляция между суточными значениями ΔLOD и S_m^2 ухудшается, коэффициент корреляции становится около -0,2.

Для примера на рис. 3.4 и 3.5 показаны суточные значения аномалий продолжительности суток и квадрата склонения Луны за первые 150 дней 1987 года и аналогичные значения за 150 дней 1997 года.

Максимальное склонение Луны в 1987 году достигало значения $28,7^\circ$. Коэффициент корреляции при расчете за весь 1987 год между $dLOD$ и S_m^2 составил $-0,54$.

В 1997 году максимальное склонение Луны достигало значения $18,7^\circ$. Коэффициент корреляции при расчете за весь 1997 год между $dLOD$ и S_m^2 составил $-0,17$.

Из приведенных сведений можно сделать вывод, что влияние Луны на вариации продолжительности суток (скорости вращения Земли) может усиливаться или ослабляться с периодом около 19 лет. Далее будет показано, что лунные вариации скорости вращения Земли проявляются в изменениях атмосферного давления и температуры воздуха. Следовательно, еще одним космическим фактором колебаний климата могут быть возмущения осевого вращения Земли приливными воздействиями Луны.

3.4. Лунные возмущения в изменениях атмосферного давления

Лунные вариации скорости вращения Земли и прямое воздействие лунных приливов на атмосферу должны сопровождаться вариациями некоторых параметров в атмосфере. Вопрос заключается в количественных оценках и практической значимости такого влияния по сравнению с другими факторами.

Возможно, более заметными следует ожидать проявления лунных вариаций в изменениях атмосферной циркуляции и давления воздуха. Изменения атмосферной циркуляции, в свою очередь, тоже приводит к региональным изменениям давления. Эти проявления заведомо должны иметь региональные особенности, поэтому дальнейший

анализ проводился по данным глобальной сети метеорологических станций. Региональные особенности могут заключаться в тесноте связи вариаций давления с лунными воздействиями, в знаке воздействия и во времени запаздывания атмосферного эффекта. Не углубляясь в подробности, необходимо прежде всего получить подтверждение какого-либо проявления в атмосфере лунного воздействия и, по возможности, определить районы наиболее заметных лунных эффектов.

Исходными данными для анализа послужили сведения о склонении Луны за 1962–2010 гг. S_m (получены из Института прикладной астрономии РАН) и ежедневные данные о давлении воздуха по глобальной сети станций. Данные собраны из трех источников:

- 1) NCDC <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gsod>;
- 2) Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. of Climatol.*, 22, 1441-1453. Data and metadata available at <http://eca.knmi.nl>;
- 3) по станциям РФ данные ВНИИГМИ-МЦД 1500 станций.

По ежедневным данным о давлении воздуха на метеорологических станциях Земли (8376 станций) вычислены отклонения от нормы годового хода (получены аномалии). Базовый период норм 1971–2010 гг. Далее анализировались аномалии давления воздуха.

Причин для существования вариаций атмосферного давления много, лунные вариации, даже если они существенны, не являются доминирующими, поэтому необходим специальный метод выделения слабых возмущений от гипотетически известного источника на фоне мощных вариаций исследуемой характеристики. Таким методом является метод наложения эпох [69]. Метод хорошо работает, если известны даты событий (реперные даты), после которых ожидается отклик во временном ряде некоторой геофизической характеристики, например атмосферного давления. Реперные даты выбираются из многолетних данных. Рассматриваются также изменения геофизической характеристики за несколько дней до и после реперной даты (для сравнения). При осреднении исследуемой характеристики по многолетним

реперным датам и отдельно по каждой дате до и после нее все вариации, не связанные с исследуемыми событиями, будут погашены, а возмущения, связанные с реперными датами, останутся. Таким образом, можно выделить искомый эффект при известных датах воздействия.

Итак, выделение лунного эффекта в вариациях атмосферного давления проводилось методом наложения эпох. Реперными датами t_0 за каждый оборот Луны вокруг Земли служили даты максимального склонения Луны (наибольшего удаления от экваториальной плоскости Земли в сторону Северного полушария). T_0 – это условная дата начала оборота Луны вокруг Солнца. Последующие за ней даты $t_0, t_1, t_2 \dots t_{26}$ охватывают полный цикл изменения склонения. Сидерический период Луны 27,32 суток, за год она делает около 13 оборотов вокруг Земли. Если каждый раз изменение ее склонения сопровождается подобными эффектами в изменениях атмосферного давления (на фоне других составляющих изменений давления), то лунную составляющую в давлении можно выделить методом наложения эпох – путем осреднения давления за много лет отдельно по датам $t_0, t_1, t_2 \dots t_{26}$. Средние значения по каждой дате обозначим соответственно: $e_0, e_1, e_2 \dots e_{26}$. Дисперсии значений, участвующих в осреднении, обозначим по датам соответственно: $d_0, d_1, d_2 \dots d_{26}$. При таком осреднении лунные возмущения в каждый из дней $t_0 \div t_{26}$ будут каждый раз в соответствующей фазе, а все другие составляющие колебаний давления окажутся случайными по отношению к выбранным реперным датам. Значения $e_0, e_1, e_2 \dots e_{26}$ являются результирующими значениями МНЭ. Осреднение по выбранным датам, составляющее суть МНЭ, позволяет погасить случайные возмущения и оставить возмущения, связанные с реперными датами. При этом дисперсии $d_0, d_1, d_2 \dots d_{26}$ характеризуют шум от неполного погашения случайных возмущений. Здесь под случайными возмущениями понимаются вариации давления, не связанные с реперными датами.

Для получения сравнительных оценок вклада изменения склонения Луны в изменения аномалий давления дополнительно были назначены списки тестовых реперных дат, случайных по отношению к

датам изменения склонения Луны. Дата первое января каждого года и последующие даты с периодом 27 суток принимались за очередную серию тестовых дат $T_0, T_1, T_2 \dots T_{26}$. В каждом году было назначено 13 серий таких тестовых дат. По ним были вычислены многолетние средние значения давления $E_0, E_1, E_2 \dots E_{26}$ и дисперсии $D_0, D_1, D_2 \dots D_{26}$, которые характеризуют общую изменчивость вариаций давления. То есть даты t_0 каждый год подстраиваются под начало лунного оборота. Даты T_0 каждый год неизменны и случайны по отношению к лунным оборотам.

Если реперные даты $t_0, t_1, t_2 \dots t_{26}$ действительно определяют некоторую определенную фазу воздействия Луны на давление воздуха, тогда дисперсия шума – дисперсия значений, приходящихся на реперные даты t_0 и другие ($t_1, t_2 \dots t_{26}$), должна быть меньше общей дисперсии давления – дисперсии, вычисленной за те же годы по датам $T_0, T_1, T_2 \dots T_{26}$.

Дисперсии давления d_i , вычисленные по датам склонения Луны $t_0, t_1, t_2, \dots t_{26}$, сравнивалась с дисперсией давления D_i по датам $T_0, T_1, T_2, \dots T_{26}$. Вклад (F) склонения Луны в общую дисперсию давления по датам оценивался в процентах:

$$F_i = 100\%(D_i - d_i) / D_i.$$

Если даты $t_0, t_1, t_2 \dots t_{26}$ так же случайны, как даты $T_0, T_1, T_2 \dots T_{26}$, то дисперсии D_i и d_i будут равны, а вклад будет равен нулю. Если же даты $t_0, t_1, t_2 \dots t_{26}$ не случайны, тогда дисперсия d_i будет стремиться к нулю, а вклад – к 100 %.

За обобщенную характеристику вклада склонения Луны в общую дисперсию давления за полный оборот Луны принималось среднее значение за 27 суток оборота Луны:

$$F = \frac{1}{27} \sum_{i=1}^{27} F_i.$$

Анализ вклада лунного эффекта в общую дисперсию давления хорош тем, что позволяет сразу получить количественную оценку изучаемого явления и на первом этапе не вдаваться в подробности эффекта (знак эффекта, время запаздывания).

На рис. 3.6 показана карта расположения метеорологических станций, использованных в работе.

Из рисунка видно, что густота станций не равномерная по регионам Земли, однако все регионы охвачены данными наблюдений. Это позволяет строить карты региональных особенностей исследуемого явления.

Вклад склонения Луны в общую дисперсию давления анализировался отдельно по месяцам. По астрономическим данным о склонении Луны за 1971–2010 гг. каждый год был разбит на условные лунные месяцы. Началом первого лунного месяца выбиралась первая дата в году наступления максимума склонения Луны, за начало второго лунного месяца выбиралась дата второго наступления максимума склонения (примерно через 27 суток) и т.д. Таким образом выбрано 13 реперных дат t_0 начал 13 лунных месяцев в каждом году. Каждый год эти реперные даты приходятся на разные календарные даты.

По списку реперных дат методом наложения эпох обработаны все станции глобальной сети. И получены оценки дисперсий, необходимые для вычисления вклада лунного эффекта в общую дисперсию давления отдельно по каждому лунному месяцу. Последовательность всех 13 лунных месяцев по 27 суток каждый характеризует годовой ход исследуемого явления.

На рис. 3.7–3.19 показаны карты вклада склонения Луны в вариации давления воздуха по всем регионам Земли за все 13 лунных месяцев. Вклад менее 10 % рассматривался как отсутствие вклада, на картах регионы с лунным эффектом менее 10 % показаны белым цветом. Последовательный анализ по всем месяцам региональных особенностей лунного эффекта позволил выделить важные особенности.

Изложение результатов удобнее начать с холодного сезона в Северном полушарии – с 12-го лунного месяца. 12-й лунный месяц начинается в ноябре.

В 12-м лунном месяце на карте (рис. 3.7) преобладает белый цвет, означающий, что изменения склонения Луны не сопровождаются существенными изменениями атмосферного давления в этих районах.

За исключением района Индо-Ганской низменности, нигде более в Северном полушарии влияние Луны не обнаружено в 12-м лунном месяце. Однако в Южном полушарии заметное влияние Луны при изменении ее склонения проявляется в Антарктиде, в южной половине Южной Америки, на южной окраине Африки, в южной половине Австралии. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления составляет преимущественно от 10 до 25 %, но в некоторых небольших регионах составляет до 30–35 %. Кроме района реки Ганг, все остальные регионы находятся в Южном полушарии, в ноябре там начало теплого сезона.

В 13-м лунном месяце (декабрь) начинается слабое смещение к северу границ районов с заметным вкладом изменений склонения Луны в изменения атмосферного давления (рис. 3.8). Так в Южной Америке влияние Луны с вкладом до 20 % распространилось до экватора, а в южной половине этого континента вклад Луны повысился до 40 %. Увеличился вклад в южной половине Австралии, а в районе реки Амур на Дальнем Востоке появился новый регион с вкладом Луны 10–20 %.

Следующий месяц – январь (рис. 3.9), в нем ослабляется вклад Луны во всех указанных ранее регионах Южного полушария, происходит смещение лунного влияния к северу, расширяется район влияния Луны в южной части Азии (охватывает все высокогорные области: Гималаи, Тибет, Алтай и др.) и появляется обширный регион влияния Луны в Северной Америке со вкладом до 20 %. То есть в январе лунное влияние ослабляется в Южном полушарии и усиливается в Северном полушарии.

На побережье Антарктиды в январе еще сохраняется влияние Луны, его вклад в давление составляет 20–30 %.

Во втором месяце – конец января–февраль – (рис. 3.10) области влияния Луны расширяются на всех континентах Земли и смещаются к северу. Районы с лунным эффектом 20–30 % появились на севере Южной Америки и на северо-западе Африки, на западе Северной Америки и на севере Азии. А в Антарктиде влияние Луны не обнаружено во втором месяце.

В третьем месяце (рис. 3.11) лунный эффект со вкладом более 10 % распространяется примерно на половину Северной и Южной Америк, на всю Африку и почти на всю Евразию. Значительно усилился вклад Луны в общую дисперсию давления в умеренных и высоких широтах Северного полушария и на севере Австралии. В некоторых обширных районах лунный вклад на указанных территориях составил 30–40 %.

В четвертом месяце (рис. 3.12) значительно увеличился лунный эффект в умеренных и высоких широтах Северного полушария Земли, вклад в основном составляет 25–40 % и более. Кроме этого, лунный эффект усилился до 25–40 % на полуострове Индокитай, островах Океании и севере Австралии. Лунный эффект исчез в Южной Америке, в южной половине Африки, на полуострове Индостан и в краю высочайших гор Азии.

Итак, в четвертом лунном месяце (март–апрель) в Южном полушарии влияние Луны заметно сократилось, оно сохранилось только на севере Австралии, островах Океании и на о. Мадагаскар. А в Северном полушарии лунный эффект стал более значительным по величине и распространился почти на всю его территорию.

В пятом месяце (рис. 3.13) продолжилась тенденция усиления лунного эффекта в Северном полушарии и его исчезновение в Южном полушарии. Севернее 15 °с.ш. почти повсеместно лунный эффект в вариациях давления составляет от 25 до 40 %, а на севере Евразии и в некоторых районах Северной Америки эффект превышает 40 %. В Австралии влияние Луны в пятом месяце не обнаружено, существенно ослабло оно и в Океании.

В шестом лунном месяце (май–начало июня) лунные эффекты также ярко выражены почти на всей территории Северного полушария (рис. 3.14). В Северной Америке и в Азии расширились области с лунным вкладом в дисперсию давления более 40 %. В этом лунном месяце (май–июнь) достигается максимум лунного влияния на атмосферное давление в Северном полушарии Земли.

Южное полушарие в этом месяце практически не зависит от изменения склонения Луны.

Седьмой лунный месяц (рис. 3.15) является переломным в росте Лунного влияния в Северном полушарии. В этом месяце в северных регионах началось ослабление вклада, сократились районы со вкладом больше 30–40 % и более, а в Южном полушарии лунный эффект в этом месяце совсем не проявляется.

В восьмом месяце (рис. 3.16) в высоких широтах Северного полушария лунный эффект практически исчез, за исключением 10–15 % лунного вклада в давление на севере Канады. Наибольший лунный эффект переместился из северных широт в умеренные, а по величине он ослаб до 25–30 % вклада в общую дисперсию (умеренные широты Северной Америки и Европы). При этом слабый лунный эффект появился в давлении на севере Южной Америки (10–20 %), охватил всю Африку (10–30 %), Аравийский полуостров и Иранское нагорье (15–35 %) и появился в Океании и Австралии (до 25 %).

В девятом месяце (рис. 3.17) в Северном полушарии лунный эффект исчез почти полностью, за исключением района в Африке около 15 °с.ш. и долины Ганга (15–25 %), но появился в южной половине Южной Америки (20–30 %), в Австралии (до 30 %) и в Антарктиде (10–25 %).

В десятом лунном месяце (рис. 3.18) продолжилась тенденция смещения с севера на юг очагов лунных влияний на давление. Усилилось лунное влияние в Южной Америке, Африке и Антарктиде.

В 11-й лунный месяц (октябрь–ноябрь) все Северное полушарие оказалось не подвластно склонению Луны, а в Южном полушарии, наоборот, влияние усилилось, вклад составил до 30–40 % в Южной Америке, Австралии и Антарктиде (рис. 3.19).

Далее, как уже было описано, в 12-м и 13-м лунных месяцах (ноябрь–декабрь) лунный эффект в атмосферном давлении – преимущественно только в Южном полушарии Земли.

Итак, в начале лета Южного полушария (октябрь–ноябрь) достигается максимум лунного влияния на вариации атмосферного давления в умеренных и высоких южных широтах.

Далее год завершится и начнется новый год. В первом месяце нового года опять начнется смещение к северу областей лунных влияний

на атмосферное давление. В течение года происходит перемещение очагов лунных влияний из высоких и умеренных широт Южного полушария (в начале лета Южного полушария) через экватор в умеренные и высокие широты Северного полушария (в начале лета Северного полушария) и затем обратно через экватор в Северное полушарие.

В целом, анализируя весь год, видно, что вклад Луны в общую дисперсию давления воздуха в Северном полушарии бывает больше, чем в Южном.

Итак, изменение склонения Луны при ее движении вокруг Земли сопровождается неслучайными вариациями атмосферного давления, проявление которых сильно зависит от сезона года и географической широты. Вклад лунного эффекта в общую дисперсию аномалий давления пространственно не однороден, в основных очагах вклад составляет 40 % и более. Максимальный эффект от изменения склонения Луны проявляется в атмосферном давлении в конце весны или в начале лета соответствующего полушария: в мае–июне в Северном полушарии и октябре–ноябре в Южном полушарии.

Приведенные результаты показывают существенное влияние изменений склонения Луны на изменения давления воздуха в различных регионах Земли. Обнаружена широтная и сезонная зависимость эффективности лунного влияния на давление воздуха.

3.5. Лунные возмущения в изменениях температуры воздуха

Выше было показано наличие статистически достоверных возмущений атмосферного давления при изменении склонения Луны во время ее движения вокруг Земли. Луна совершает полный оборот вокруг Земли за 27,3 суток (сидерический лунный месяц) и оказывает существенное влияние на скорость вращения Земли и атмосферное давление. Происходящие при этом неизбежные изменения атмосферной циркуляции создают предпосылки для перераспределения тепла

на планете. Ставилась задача получения количественных оценок проявления лунного эффекта в изменениях температуры воздуха и описания сезонных и пространственных различий такого эффекта на всей Земле. Механизм появления лунных возмущений в атмосфере не вполне известен, но если лунные возмущения передаются в поле температуры через изменения атмосферной циркуляции, то температурные возмущения заведомо должны иметь сезонные и пространственные различия в соответствии с сезонными перестройками атмосферной циркуляции.

Основным методом в данной работе выбран метод оценки относительного вклада исследуемого фактора в общую дисперсию температуры воздуха.

Так же как при анализе эффекта в давлении воздуха, в качестве лунного показателя выбрано склонение Луны. Наличие какого-либо лунного воздействия в вариациях температуры воздуха оценивалось по процентному вкладу вариаций, вызванных изменениями склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха. Выделение вариаций температуры, вызванных изменениями склонения Луны, выполнено методом наложения эпох (МНЭ), который описан в разделе 3.4.

Исходными данными для анализа послужили сведения о склонении Луны за 1962–2010 гг. S_m (получены из Института прикладной астрономии РАН) и ежедневные данные о температуре воздуха по глобальной сети станций.

Данные о температуре воздуха по станциям Земли собраны из тех же трех источников, которые были указаны ранее для давления воздуха. Общий массив составил 8376 метеорологических станций Северного и Южного полушарий Земли с ежедневными данными о температуре за период 1971–2010 гг. Анализировались аномалии температуры воздуха, полученные как отклонения исходных среднесуточных значений от норм за период 1971–2010 гг.

В МНЭ реперными датами t_0 за каждый оборот Луны вокруг Земли служили даты максимального склонения Луны (наибольшего

удаления от экваториальной плоскости Земли в сторону Северного полушария). T_0 – это условная дата начала оборота Луны вокруг Солнца.

Анализ проводился отдельно по лунным месяцам в полной аналогии с подобным анализом лунного эффекта в изменениях атмосферного давления (разд. 3.4). Таким образом, с помощью МНЭ были получены оценки лунного эффекта в температуре воздуха на 8376 станциях отдельно по 13 лунным сидерическим месяцам. Это позволило получить 13 карт пространственных особенностей лунного вклада в общую дисперсию аномалий температуры и по ним проследить сезонные и широтные различия. Каждое значение вклада на станции получено по данным за 40 лет по каждому отдельному лунному месяцу (дисперсии получены по 40 значениям). Критическое значение Фишера с уровнем значимости 0,95 для таких оценок составляет менее 1,7. С учетом соотношения между оценкой Фишера и оценкой вклада в общую дисперсию получаем, что с достоверностью, превышающей 95 % изменения склонения Луны, создают вариации в аномалиях температуры на тех станциях, на которых вклад составляет 40 % и более.

На рис. 3.20–3.32 показано пространственное распределение вклада склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%).

В первом лунном месяце (рис. 3.20) изменения склонения Луны очень слабо проявляются в изменениях температуры воздуха – на ограниченных территориях лунный эффект составляет 10–20 %, а на основной части континентов планеты совсем не проявляется на фоне всех других вариаций температуры.

Во втором лунном месяце (рис. 3.21) лунный эффект четко проявляется в умеренных широтах Северного полушария. Изменение склонения Луны сопровождается вариациями в температуре воздуха в зоне 45–70 °с.ш. в Северной Америке и Евразии с достоверностью более 95 %. Вклад Луны в общую дисперсию температуры часто превышает 40 %.

В третьем лунном месяце (рис. 3.22) зона достоверного лунного эффекта (вклад >40 %) расширяется и охватывает широты от 40 до 70 °с.ш., а величина лунного вклада в изменения температуры на

значительной территории в Северной Америке и в Евразии в указанной зоне превышает 40 % и доходит до 65–75 %. В области 15 °с.ш. в Африке и 15–40 ° ю.ш. в Австралии появились области, в которых лунный эффект составляет 25–30 %.

В четвертом лунном месяце (рис. 3.23) зона лунного эффекта еще более расширяется на север. В Америке и в Евразии области с эффектом более 40 % охватывают широты от 40 ° с.ш. до побережья Северного Ледовитого океана, включая Гренландию. Одновременно стала расширяться вторая широтная зона лунного влияния в области от экватора до 35 °с.ш. в Африке и Евразии и в области 15–35 °с.ш. в Америке. Но на 35–40 °с.ш. сохранились области с лунным эффектом менее 40 % и даже менее 20 %, особенно слаб лунный эффект в Евразии на указанных широтах.

В пятом лунном месяце (рис. 3.24) еще более усилился лунный эффект в высоких северных широтах Америки и Евразии, а также на юге Северной Америки, в северной Африке и на юге Евразии, за исключением полуострова Индостан. На 65–75 °с.ш. вклад лунного цикла в температуру составляет от 60 до 80 %. Но одновременно появилась полоса слабого лунного эффекта или полного его отсутствия на 45–60 °с.ш. в Америке и в Евразии. Таким образом, стали заметны две широтные зоны с усилением лунного эффекта и полоса слабого эффекта между ними.

В шестом лунном месяце (рис. 3.25) в Северной Америке мало что изменилось, а в Евразии наибольший по площади значимый лунный эффект переместился на юг в зону 15–45 °с.ш. А на севере область с эффектом >40 % осталась на побережье Северного Ледовитого океана. Наличие двух широтных зон лунного эффекта сохранилось.

В седьмом лунном месяце (рис. 3.26) две полосы лунного эффекта сместились немного на юг, в высоких широтах появилась полоса отсутствия (в Евразии) или слабого (в Северной Америке) влияния Луны на температуру воздуха.

В восьмом месяце (рис. 3.27) сохранилась широтная двухполосность лунного эффекта и началось расширение областей отсутствия лунного эффекта в средних широтах. При этом северная полоса

сместилась к северу, а южная – к югу. В высоких широтах лунный эффект опять стал значимым ($>40\%$).

В девятом месяце (рис. 3.28) продолжилась тенденция расширения широтной зоны с отсутствием лунного эффекта до такой степени, что значимый лунный эффект сохранился только в узкой полосе севернее 60° с.ш. А на юге Евразии сохранились области с лунным эффектом не более 25% . Но одновременно наметилась тенденция усиления лунного эффекта в Южном полушарии Земли. Так в Южной Америке, в Австралии и Антарктиде появились области с вкладом Луны в изменения температуры до $25\text{--}30\%$.

В десятом месяце (рис. 3.29) в Северном полушарии лунный эффект почти не проявляется, но расширился по площади и усилился по величине лунный эффект в Южной Америке и в Антарктиде.

В 11–13-м лунных месяцах (рис. 3.30–3.32) лунный эффект обнаруживается только в Южном полушарии. Вклад $>40\%$ наблюдается в Южной Америке и Антарктиде. А на юге Африки вклад $>40\%$ наблюдается только в 13-м лунном месяце.

Анализируя выявленные пространственные особенности лунного эффекта в разные месяцы и сопоставляя их со сменой сезонов года, получаем, что изменения склонения Луны сопровождаются заметными изменениями температуры (на общем фоне температурной изменчивости) в Северном полушарии Земли в первом полугодии начиная с февраля. При этом в Южном полушарии лунный эффект в температуре не выделяется из общей изменчивости температуры.

В начале осени начинают появляться слабые проявления лунного эффекта в некоторых районах Южного полушария. А начиная с середины осени и до конца года значимый лунный эффект в температуре проявляется только в Южном полушарии Земли.

В результате выполненного анализа получено, что изменения склонения Луны за время ее полного оборота вокруг Земли сопровождаются неслучайными изменениями температуры воздуха в разных регионах земного шара, которые статистически достоверно выделяются на общем фоне изменчивости температуры. Вклад лунного эффекта зависит

от сезона года и географической широты. При благоприятных соотношениях сил лунного воздействия и общей изменчивости температуры вклад лунного эффекта превышает 40 % общей дисперсии, а в высоких широтах Северного полушария может достигать 60–80 %.

3.6. Климатогенные возмущения движения Земли планетами

Сведения о влиянии планет на погодно-климатические условия на Земле известны с давних времен. Существует полный спектр высказываний от полного отрицания планетных воздействий на атмосферные процессы до признания конфигурации планет дирижерами всех погодно-климатических вариаций и самой активности Солнца. Действительно, в атмосферных процессах обнаруживаются циклы соединений планет с Землей и между собой, но эти циклы очень неустойчивы и часто совсем исчезают, чтобы опять появиться, но совсем в другом качестве. Если не вникать в астрономические подробности неравномерности движения планет и их соединений, то, с точки зрения строгой статистической науки, легко доказать полное отсутствие планетно-атмосферных взаимодействий. И таких поспешных работ и выводов сделано достаточно.

Существует не мало работ, в которых обнаружено влияние планетных конфигураций на инсоляцию. В работе [6] рассчитан приходящий на Землю поток излучения Солнца в предположении неизменности его светимости на интервале времени с 1700 по 2000 г. В спектре мощности временного ряда инсоляции обнаружены гармоника синодических периодов планет Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна, а также гармоника, соответствующие комбинационным частотам. Их периоды заключены в интервале от 100 сут до 15,7 года. Основными гармониками спектра мощности являются гармоника, соответствующая синодическому периоду Юпитера 399,0 сут, и первая гармоника синодического периода Венеры с периодом 291,9 сут. Их амплитуды приблизительно равны и составляют около 40 мВт/м^2 .

Влияние планет на инсоляцию подтверждалось и ранее. Мало изученными остаются процессы динамического воздействия космоса на оболочки Земли.

Для дальнейшего изложения необходимо напомнить астрономические сведения, имеющие важное значение в дальнейших исследованиях.

Все планеты вместе по массе составляют около 0,2 % от массы Солнечной системы. Солнце – самый большой объект в солнечной системе, оно содержит более чем 99,8 % массы всей Солнечной системы. Это обычная звезда спектрального класса G2, одна из 100 млрд звезд нашей Галактики. Если массы планет (без спутников) выразить в единицах массы Земли, тогда их массы составляют: Юпитер – 317,83, Сатурн – 95,147, Уран – 14,54, Нептун – 17,23, Плутон – 0,17. Планеты земной группы: Меркурий – 0,0554, Венера – 0,815, Земля – 1, Марс – 0,1075. Приведенные значения показывают, что общая масса всех планет количественно формируется практически только Юпитером и Сатурном, массы остальных планет незначительны [4].

Важной характеристикой является расстояние от Солнца до планеты (большая полуось). Для разных планет оно составляет в астрономических единицах: Меркурий – 0,387, Венера – 0,723, Земля – 1, Марс – 1,523, Юпитер – 5,202, Сатурн – 9,538, Уран – 19,182, Нептун – 30,058, Плутон – 39,44 [4].

Существуют базовые количественные астрономические значения, ответственные за климат на Земле. Насколько они важны? Каким был бы климат при других значениях? Рассмотрим крайние случаи.

В современную эпоху ось вращения Земли составляет с плоскостью ее орбиты угол $\sim 66^{\circ}34'$. Если бы ось вращения Земли составляла с плоскостью ее орбиты прямой угол, то плоскость экватора всегда бы совпадала с плоскостью орбиты планеты. При этом Солнце всегда бы оставалось в этой же плоскости в любое время суток в течение всего года, и день всегда был бы равен ночи на всех широтах Земли. Но на экваторе днем Солнце было бы в зените, а на полюсах – всегда на горизонте. Контрасты климата экваториальных и высоких широт резко

бы возросли, смена сезонов бы исчезла. За этим последовали бы увеличение площади ледяных шапок на обоих полюсах, увеличение альбедо Земли и похолодание климата, которое могло бы привести к состоянию «белой Земли».

Если бы ось вращения Земли лежала в плоскости эклиптики, температурный максимум поочередно через полгода переходил бы от одного полюса к другому. В одном полушарии лето совпадало бы с полугодовым днем, а в другом в это время была бы зима и полугодовая ночь. Многолетние льды на полюсах не могли бы существовать, но через каждые полгода в одном полушарии появлялись бы льды с площадью, значительно превышающей площадь современных полярных шапок. В следующие полгода – полное таяние льдов в одном полушарии и новая ледяная шапка в другом.

В обоих случаях жизнь на Земле была бы невозможна.

Описание возможных состояний климата, которые сформировались бы при изменении наклона земной оси вращения, дает представление о решающей значимости астрономических факторов климата. В обозримом прошлом таких астрономических катаклизмов не происходило, но небольшие вариации наклона земной оси всегда были и существуют в наше время. Логично предположить, что за небольшими вариациями наклона земной оси следуют небольшие изменения климата. Известно много процессов на Земле и за ее пределами, которые могут влиять на климат, астрономический фактор можно рассматривать как одну из возможных составляющих изменений климата.

Представление о движении Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите является очень грубым упрощением. В астрономических расчетах на эллиптическую орбиту накладывают возмущения, вызванные притяжением других планет и Луны, а также несферичностью планет и Луны. В Астрономическом ежегоднике элементы орбит планет приведены в двух составляющих: эллиптическое движение и его возмущения.

Земля всегда испытывает переменные повторяющиеся гравитационные воздействия со стороны других тел Солнечной системы.

В результате таких воздействий составляющие движения Земли никогда не остаются постоянными. Возмущения могут сильно отличаться по величине и иметь разный временной масштаб от нескольких дней до многих тысячелетий.

Величины возмущений параметров движения Земли зависят от массы возмущающих тел и от расстояния от них до Земли. Поэтому в движении Земли наиболее сильные возмущения определяются ближайшими телами – Луной, Венерой, Марсом и массивным Юпитером. Влияние огромного Сатурна слабее из-за его большой удаленности. Значение имеют масса планеты и расстояние от нее до Земли. Возмущения от перечисленных небесных тел передаются Земле одновременно с разных направлений, поэтому результирующее возмущение зависит еще от взаимного расположения небесных тел между собой и относительно Земли. Например, при расположении Венеры, Земли и Юпитера с одной стороны от Солнца (орбиты Венеры и Юпитера по разные стороны от Земли) их результирующее влияние на Землю минимально, происходит взаимное погашение. А при расположении Земли, Марса и Юпитера с одной стороны от Солнца (орбиты Марса и Юпитера по одну сторону от Земли) их результирующее влияние на Землю максимально, происходит суммирование воздействий.

Очень грубо движение Земли можно представить в виде движения вокруг Солнца по эллиптической орбите с возмущениями, вызванными притяжением других планет и Луны, а также дополнительными факторами, например несферичностью планет. Величины возмущений Земли зависят от массы каждого возмущающего тела и положения относительно Земли и Солнца, в частности от расстояния. Поэтому в движении Земли наиболее сильные возмущения определяются Венерой, Юпитером, Луной и Марсом, причем при расположении Венеры и Юпитера с одной стороны от Солнца их взаимное влияние минимально. В этом случае Земля оказывается между Венерой и Юпитером, а их одновременные воздействия с разными знаками взаимно поглощаются.

Возмущения от Луны в движении Земли соизмеримы с возмущениями от Юпитера. Из этого следует, что в те дни, когда Земля

оказывается между Луной и Юпитером, их одновременные воздействия ослабляются.

Гравитационное воздействие Луны и Солнца на Землю приводит к вариациям наклона земного экватора и скорости ее осевого вращения, а гравитационное воздействие планет на Землю во время схождения Земли и планеты на одном гелиоцентрическом меридиане приводит к изменению гелиоцентрической широты Земли (покачивание орбиты), скорости ее орбитального движения и расстояния от Земли до Солнца. То есть под действием планет всегда возникают вариации движения Земли по всем трем координатам пространства.

Покачивание орбиты означает, что Земля в своем орбитальном движении испытывает северо-южное ускорение разного знака в диаметральных секторах орбиты. Замедление или ускорение орбитального движения в некотором секторе орбиты означает увеличение или сокращение длительности того или иного сезона – прямое воздействие на среднегодовой приток тепла. Изменение расстояния от Земли до Солнца в некоторых сезонах – это тоже прямое воздействие на среднегодовой приток тепла.

Кроме того, любое ускорение или замедление планеты с ее сложным внутренним строением (включая слои в жидкой фазе) с океаном и атмосферой неизбежно нарушает спокойное состояние каждой оболочки и нарушает равновесие в их взаимодействии.

Итак, гравитационное взаимодействие Земли с планетами и Луной создает вариации в скорости движения Земли по орбите в северо-южном и радиальном отклонениях от нормальной орбиты, создает прецессию и нутацию земной оси, изменяет скорость вращения Земли вокруг своей оси. В процессе взаимодействий изменяется расстояние от Земли до Солнца. Это как раз те параметры, которые определяют космическую (главную) часть процессов, формирующих климат Земли. Вопрос заключается в том, являются ли эти вариации настолько существенными, чтобы заметно влиять на колебания климата Земли. Влияние перечисленных параметров на климат Земли обычно рассматривается в части изменения притока и условий поглощения солнечного излучения.

Вариации в движении Земли по орбите, неравномерность ее движения неразрывно связаны с появлением ускорения движения положительного или отрицательного. Вариации в движении проявляются не только в плоскости орбиты, но и в северо-южных отклонениях от средней орбитальной плоскости. Влияние ускорений движения Земли на все ее сферы пока никто не рассматривал.

3.7. Сезонные вариации в расстоянии от Земли до Солнца и в глобальной температуре

В научной литературе много раз появлялись сообщения о влиянии конфигурации планет на климат Земли [35, 80, 84], однако изучению физических механизмов такого влияния уделяется мало внимания. Отсутствие понимания возможных механизмов связи климата на Земле с планетными конфигурациями ставит под сомнение сам факт такой связи.

Если динамика Солнечной системы заметно влияет на Землю, то это влияние должно проявляться прежде всего в динамических характеристиках Земли, а затем – в климате. Важнейшими для климата динамическими характеристиками Земли являются скорость осевого вращения Земли и нутация земной оси. Значения этих характеристик непосредственно влияют на общую циркуляцию атмосферы, на перераспределение тепла и на климат всей Земли. Поэтому далее будем анализировать изменения климата в связи с изменениями динамических характеристик Земли, которые хорошо известны по астрономическим наблюдениям и регулярно публикуются в астрономических изданиях.

Аномалии расстояния Солнце–Земля

Земля имеет эллиптическую орбиту, эллипс ориентирован так, что зимой расстояние от Земли до Солнца наименьшее, а летом – наибольшее. Отклонения расстояния до Солнца от известного эллипса

будем рассматривать как аномалии расстояния. Отклонения траектории Земли по широте от плоскости эклиптики или по долготе на заданный день года – это тоже аномалии движения, которые заслуживают изучения. Перечисленные аномалии в движении Земли наблюдаются регулярно и возникают они под воздействием других планет.

В работе использовались астрономические данные, публикуемые в Астрономическом ежегоднике [5]: радиус-вектор Солнца в геоцентрических координатах (расстояние Солнце–Земля), гелиоцентрическая широта и долгота планеты Земля за 1900–2010 гг. Астрономический ежегодник – это наиболее достоверный источник астрономической информации, который готовится на теоретической основе Международного астрономического союза. Все астрономические данные были получены в Институте прикладной астрономии по наиболее точной современной методике (с учетом резолюций, принятых XVI, XVII и XVIII генеральными ассамблеями МАС – Монреаль-1979, Парты-1982, Гренобль-1986).

Данные о радиусе-векторе полюса вращения Земли получены из Международной службы вращения Земли.

Традиционно астрономические величины рассчитываются по юлианскому календарю, а метеорологические данные формируются по григорианскому календарю. Перевод астрономических данных на григорианский календарь нельзя осуществлять простым введением известного чередования високосных и невисокосных лет, так как во временных рядах возникают «скачки» с периодом 4 года, связанные с високосными годами. В настоящей работе эти «скачки» были устранены введением поправок, которые определены по многолетним данным статистически на каждый день года в зависимости от числа прошедших лет после ближайшего високосного года накануне. Таким образом, ложная 4-летняя цикличность в астрономических данных была устранена.

В работе применяется метод расчета условных средних по выборкам лет, условия составляются в соответствии с гипотезой. Средние значения по некоторым условиям дают возможность оценить

значимость этого условия для анализируемой величины. Оценки достоверности различий средних значений получаются на основе анализа стандартных отклонений. Количественные оценки вклада условий выборки в общую изменчивость ряда вычисляются методом дисперсионного анализа.

Для исследования сезонных особенностей анализируемых величин составляются две выборки лет с заведомо известными противоположными по заданному критерию условиями. Сравнение осредненных при одних и других условиях месячных значений некоторой характеристики позволяет судить о значимости этих условий.

Данные на каждый день года о расстоянии Солнце–Земля S и данные о гелиоцентрической широте и долготе Земли показывают, что каждый год Земля имеет разные траектории движения вокруг Солнца.

По данным S_i на каждый месяц были вычислены аномалии расстояния Солнце–Земля как разность между текущим значением и многолетними нормами S на этот месяц. Многолетние нормы S вычислены за период 1920–2000 гг. О выборе периода для расчета норм будет сказано ниже.

В таблице 3.1 показано распределение знака аномалий расстояния Солнце–Земля за каждый месяц с 1910 по 2009 год (значения расстояния и аномалий вычисляются с точностью, заведомо превышающей потребности подобного анализа).

Из таблицы видно, что с начала века и до 1954 года аномальное удаление Земли наблюдалось в первую половину года. В это же время во вторую половину года Земля находилась аномально близко к Солнцу. В последующие несколько лет положительные аномалии стали перемещаться из первого полугодия сначала на летний сезон, а затем и во второе полугодие. Так что начиная с 1964 года положительные аномалии полностью переместились во второе полугодие и сохраняются там до сих пор. А в первом полугодии образовались отрицательные аномалии (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Знак месячной аномалии r – расстояния Солнце–Земля

Год	Месяцы												Год	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1910	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1960	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
1912	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1962	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
1914	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1964	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1916	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1966	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1918	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1968	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1920	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1970	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
1922	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1972	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
1924	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1974	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1926	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1976	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1928	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1978	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
1930	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1980	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
1932	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1982	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1934	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	1984	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
1936	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	1986	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1938	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	1988	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1940	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	1990	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
1942	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1992	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
1944	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1994	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1946	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	1996	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1948	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	1998	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1950	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	2000	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1952	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	2002	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1954	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	2004	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1956	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	2006	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
1958	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	2008	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+

Для получения численных оценок сезонных особенностей аномалий движения Земли были вычислены многолетние среднемесячные значения аномалий расстояния Солнце–Земля по двум выборкам лет отдельно. Выборки составлялись на основе анализа табл. 1. С 1964 года до конца ряда 35 лет наблюдалось однородное сезонное распределение аномалий в табл. 1. Эти годы составили выборку *C2*. Другие однородные сезонные условия наблюдались от начала ряда (1900 г.) до 1954 года, но в выборку лет *C1* были взяты последние 35 лет, т.е. с 1920 по 1954 г., чтобы обеспеченность статистик была одинаковой по двум выборкам. Период лет, по которым вычислялись нормы, взят с 1920 по 2000 год так, чтобы равномерно охватить все варианты

возможного годового хода S , в этом случае полученные среднемесячные значения S будут действительно нормами, описывающими известный эллипс орбиты Земли. На рис. 3.33 показаны кривые годового хода аномалий расстояния Солнце–Земля по двум выборкам лет.

Из рисунка 3.33 видно, что в годы выборки $C1$ (в первой половине XX столетия) Земля, совершая ежегодное движение по орбите, отклонялась от нормальной траектории – удалялась от Солнца – в первой половине года, и особенно сильно удалялась весной. В эти же годы во второй половине года она двигалась несколько ближе к Солнцу, чем при нормальной траектории, и особенно близко осенью. Начиная с 1964 года годы выборки $C2$ в те же сезоны знак отклонений движения Земли от нормальной траектории изменился. Весной она оказывалась ближе к Солнцу, чем при нормальной траектории, а осенью – дальше.

Аномалии притока солнечной радиации

Приток солнечной радиации к Земле находится в обратной квадратической зависимости от расстояния Земля–Солнце. В настоящую эпоху Земля находится в перигелии в январе, а в афелии – в июле, известно, что в январе интенсивность солнечной радиации на 3,3 % больше, а в июле – на 3,4 % меньше солнечной постоянной, разность между ними δR достигает 6,7 %, при этом расстояние Земля–Солнце в афелии и в перигелии отличается примерно на 6 млн км. ($\delta r = 6$ млн км). Аномалии, приведенные на рис. 3.33, примерно в 50 раз меньше, чем между афелием и перигелием. С учетом квадратической зависимости между притоком радиации и расстоянием Солнце–Земля можно записать следующее:

$$\frac{\delta R}{\delta r^2} = \frac{\varepsilon}{(\delta_r/50)^2},$$

где ε – изменение притока радиации в связи с наблюдаемыми месячными расстояниями Земля–Солнце. Отсюда, подставив значения, $\delta R = 6,7 \%$ и $\delta r = 6$ млн км, получим $\varepsilon = 0,003 \%$. Это означает, что происходящие в нашем столетии возмущения орбиты Земли приводят к изменению интенсивности радиации у Земли на 0,003 %. Таких аномалий

притока радиации за некоторый месяц недостаточно для заметного влияния на климат. Поэтому далее рассмотрим другой подход к изучению роли аномального движения Земли по орбите.

Аномалии ускорения Земли и отклонения полюса вращения от географического полюса

Изменение расстояния от Земли до Солнца по закону Кеплера сопровождается изменением скорости движения Земли по орбите. Если наблюдаются аномалии расстояния Солнце–Земля, значит на определенных участках орбиты Земля испытывает дополнительное ускорение a положительного или отрицательного знака. Однако ускорение тела некоторой массы m по закону Ньютона невозможно без дополнительной силы $f = ma$. При наличии ускорения существование внешней силы не требует доказательства, необходимо только оценить эффективность воздействия этой силы на климатическую систему.

Прежде всего, сила f , приложенная к Земле, может изменить режим ее вращения. Движение Земли по орбите описывается тремя гелиоцентрическими координатами: радиус-вектор орбиты (расстояние до Солнца), долгота и широта. По каждой из трех координат можно вычислить ускорение движения, это будут составляющие результирующего ускорения Земли при движении по орбите: радиальное a_r ; касательное (долготное) a_λ ; вертикальное (северо-южное широтное) a_φ . Каждой составляющей ускорения соответствует составляющая результирующей силы: $f_r, f_\lambda, f_\varphi$. В настоящей работе представлены оценки влияния на климат вертикальной составляющей внешней силы.

По данным о гелиоцентрической широте Земли на каждый месяц вычислены значения ускорения, которые при этом испытывала Земля под действием силы, создающей изменение широты Земли относительно плоскости эклиптики.

Северо-южное смещение Земли относительно эклиптики наблюдалось в XX столетии, подобно изменению расстояния, поэтому для вычисления норм и аномалий строились те же выборки лет $C1$ и $C2$. Годовой ход ускорения, которое испытывает Земля по месяцам в годы выборки $C1$ и $C2$, показан на рис. 3.34 и 3.35. Воздействие внешней

силы на вращающееся тело должно приводить к отклонениям оси вращения и угловой скорости. Данные об отклонении оси вращения Земли от географического полюса имеются с начала века (радиус-вектор r полюса Земли) для каждого месяца. Для сравнения с годовым ходом аномалий ускорения Земли аналогично были получены аномалии радиуса-вектора r для выборок лет $C1$ и $C2$, они приведены на рис. 3.34 и 3.35.

На кривых ускорения a (рис. 3.34 и 3.35) отложены стандартные отклонения, которые показывают, что изменения ускорения a имеют неслучайный годовой ход. Сравнение годового хода ускорения движения Земли и радиуса-вектора полюса вращения Земли показывает, что с изменением ускорения (силы) происходит изменение отклонения полюса вращения от географического полюса.

Рассмотренные выборки лет были сформированы по противоположным условиям годового хода аномалий ускорения движения Земли, поэтому выявленные по этим выборкам противоположные неслучайные изменения радиуса-вектора подтверждают связь изменений радиуса-вектора с ускорением движения Земли и, следовательно, гипотезу о том, что внешняя динамическая сила Солнечной системы оказывает воздействие на положение оси вращения Земли.

Дисперсионный анализ показал, что выборки, составленные по изменению ускорения Земли, описывают 87,4 % общей дисперсии ускорения и 31,7% общей дисперсии радиуса-вектора полюса вращения Земли. Силы, возникающие при северо-южном ускорении орбитального движения Земли, оказывают существенное влияние на режим осевого вращения Земли.

3.8. Аномалии ускорения движения Земли и сезонные аномалии температуры

Далее необходимо оценить, оказывают ли влияние на климат Земли (на температуру воздуха) изменения в ускорении движения Земли. Известно, что в результате взаимодействия Земли и атмосферы

через обмен моментом количества движения любое ускорение зонального движения воздуха приводит к замедлению вращения Земли. Зависимость настолько тесная, что в работе [79] предлагается даже определять среднемесячные значения момента импульса зональных ветров всей атмосферы по данным о неравномерности вращения Земли. Аналогично любое изменение вращения Земли приводит к изменению скорости зонального потока и всей атмосферной циркуляции. Наблюдаемые изменения скорости вращения Земли невелики, но соотношение между скоростью вращения Земли и скоростью зонального потока определяется обратно пропорционально массам Земли и атмосферы. Небольшие изменения скорости вращения Земли при ее огромной массе проявляются в виде тех изменений зонального ветра, которые обычно наблюдаются.

Анализ изменений климата проводился по многолетним данным о среднемесячных температурах приземного воздуха на 1200 станциях мира. Для сравнительного анализа строились выборки лет $C1$ и $C2$, описанные в разделе 3.7. Нормы вычислялись за тот же период 1920–2000 гг.

На рис. 3.36 и 3.37 показан годовой ход аномалий приземной температуры воздуха, полученных по выборкам $C1$ и $C2$ отдельно.

Для сравнения приведены аналогичные кривые годового хода ускорения Земли, полученные ранее по тем же выборкам. На графиках температура Северного полушария Земли повторяет ход изменения ускорения движения Земли с запаздыванием 1–2 месяца. В годы выборки $C1$ и в годы $C2$ при увеличении северо-южного ускорения через 1–2 месяца повышается температура Северного полушария Земли. Выборки, составленные по годам с различным годовым ходом ускорения Земли, описывают 22,9 % общей дисперсии температуры воздуха.

На кривых температуры (рис. 3.36 и 3.37) отложены стандартные отклонения, которые подтверждают неслучайность сезонных особенностей изменения температуры под действием ускорения Земли. Земля в своем орбитальном движении подвергается воздействию гравитационных сил Солнечной системы, которые оказывают влияние

на режим осевого вращения Земли и на сезонные особенности климата Земли.

В первой половине XX столетия годовые особенности ускорения Земли создавали условия для потепления в летние месяцы, а во второй половине создавались условия для потепления зимой.

Связь изменений климата Земли с сезонными особенностями не является новой. Так, например, в [46] показано, что потепление в 20–30-х гг. в Европе происходило за счет роста температуры в летние месяцы, а потепление, которое началось в конце 60-х годов и продолжается сейчас, происходит за счет роста температуры зимних месяцев. Это полностью согласуется с изменением сезонных аномалий ускорения в XX столетии.

Более наглядное представление полученных результатов представлено ниже. Рассмотрим сезонные изменения аномалий северо-южного ускорения орбитального движения Земли за каждый год. По астрономическим данным о гелиоцентрических координатах (широта и долгота) системы Земля+Луна (далее просто Земля) на каждый месяц вычислялось ускорение ее отклонения от средней орбиты в направлении север–юг. Если в своем движении по орбите Земля отклоняется в направлении с юга на север, то возникает положительное северо-южное ускорение, а при отклонении в движении Земли в направлении север–юг возникает отрицательное северо-южное ускорение. На рис. 3.38а представлены погодичные месячные значения северо-южного ускорения движения Земли. Значения на рисунке приведены с обратным знаком для удобства последующего сопоставления с аномалиями температуры океана и атмосферы. По вертикальной оси – месяцы с января (1) по декабрь (12) и повторение с января (13) по декабрь (24). Повторение необходимо для слежения за аномалиями на переходе от декабря к январю следующего года. На рис. 3.38б и 3.38в показаны сглаженные аномалии температуры поверхности океана и температуры воздуха над континентами в широтной зоне 45–70° Северного полушария. Аномалии за каждый месяц получены как отклонение от скользящих средних за 5 лет. Таким образом, исключается годовой ход и многолетний тренд.

С начала века и до 1940-х годов в декабре–марте наблюдалось отрицательное ускорение движения Земли (рис. 3.38а). В это же время примерно в те же месяцы появлялись положительные аномалии температуры поверхности океана (рис. 3.38б) и в температуре воздуха над континентами (рис. 3.38в). В последующие 2–3 десятилетия отрицательные аномалии в движении Земли по орбите медленно перемещались к середине года. Аналогичные сезонные перемещения произошли в аномалиях температуры поверхности воды и температуры воздуха над континентами. Начиная с 1960-х годов отрицательные аномалии в движении Земли зафиксировались в середине года, аналогично положительные аномалии температуры поверхности воды стали появляться в середине года. А в аномалиях температуры воздуха положительные аномалии появлялись в середине года в 1960–1980-е годы, а позднее переместились на весенние месяцы.

Совершенно очевидно, что сезонные аномалии в движении Земли, температуры поверхности океана и температуры воздуха над континентами каким-то образом связаны между собой. Еще предстоит разобраться с механизмами таких связей, но уже понятно, что астрономический фактор необходимо учитывать в моделях климата.

Итак, установлен факт синхронного изменения ускорения орбитального движения Земли, сезонных особенностей осевого вращения Земли и сезонных аномалий температуры поверхности океана и температуры воздуха.

3.9. Диссимметрия Солнечной системы

Система Земля–Луна вращается вокруг Солнца, но Солнце не стоит на месте. Солнце и все планеты Солнечной системы вращаются вокруг их общего центра масс. Положение центра зависит от взаимного расположения планет. Равномерное распределение планетных масс по разным направлениям от Солнца сводит центр вращения Солнечной системы к центру Солнца, а в моменты, когда планетные массы

собираются по одну сторону от Солнца, центр вращения Солнечной системы смещается в сторону скопления планет и выходит за пределы Солнца, возникает большая диссимметрия Солнечной системы. В такие моменты Солнце совершает движение вокруг некоторой точки в космосе. Учитывая огромные различия в массах планет, можно говорить, что в Солнечной системе происходит вращение Солнца и больших планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) вокруг их общего центра масс, а малые планеты (Меркурий, Венера, Земля, Марс) вращаются вокруг блуждающего Солнца. Таким образом, каждая большая планета периодически смещает Солнце в пространстве. Наибольшее смещение центра Солнца относительно центра вращения Солнечной системы происходит в моменты схождения нескольких или всех планет в одном секторе от Солнца. Земля, всегда следуя за Солнцем, испытывает возмущения в орбитальном движении. При этом нарушаются все три пространственные составляющие скорости ее движения по орбите. Вопросы значимости влияния на климат таких нарушений остаются дискуссионными в научной литературе.

Что происходит с Землей в такие моменты? Планеты земной группы вынуждены следовать за своим центральным телом – за Солнцем. То есть при усилении диссимметрии Солнечной системы в орбите Земли появляются пространственные составляющие движения, которые ведут Землю и смещают всю ее орбиту за движущимся Солнцем. Изменения в движении сопровождаются ускорением разного знака (возмущениями) в движении Земли. Пространственные составляющие этих возмущений могут повлиять на покачивание орбиты Земли (на прецессию) и скорость осевого ее вращения. Это те факторы, которые способны повлиять на климат Земли.

Итак, базовые астрономические величины, ответственные за климат, никогда не остаются постоянными. Существуют медленные изменения астрономических величин, ответственных за климат, и существуют возмущения с периодами в несколько суток, лет и десятилетий, которые создают колебания элементов погоды и климата.

Сложившийся климат Земли (его естественные составляющие) полностью определяется законами движения Земли вокруг Солнца,

наклоном ее оси и скоростью осевого вращения. Любые возмущения движения или вращения способны привести к перераспределению тепла и влаги на Земле и к изменениям в климатической системе. В масштабе нескольких лет и десятилетий в Солнечной системе существуют возмущения, связанные с изменяющейся диссимметрией распределения массы больших планет по гелиоцентрическим долготам.

Диссимметрия возникает при группировке двух или нескольких планет в некотором узком секторе гелиоцентрических долгот. Она выражается расстоянием в километрах между центром Солнца и общим центром масс Солнечной системы в каждый момент времени. Неравномерное распределение планет по секторам в их орбитальном движении приводит к смещению их общего центра масс так, что центр вращения всей системы не только смещается от центра Солнца, но даже выходит за его пределы. Возникают возмущения в движении Солнца, которые передаются всем планетам, включая Землю. Диссимметрия – векторная величина, ее воздействие на Землю зависит от долготного (гелиоцентрическая долгота) положения в этот момент Земли на орбите. Гелиоцентрическая долгота Земли изменяется вместе с сезонами года. Поэтому для анализа в работе использовалась проекция P_{Ds} диссимметрии Солнечной системы Ds на направление к Земле в заданном сезоне:

$$P_{Ds} = Ds \cos (\Delta\lambda),$$

где $\Delta\lambda$ – угол между вектором диссимметрии и гелиоцентрической долготой Земли на орбите.

Значения диссимметрии вычислены по самым точным данным о гелиоцентрических координатах планет Солнечной системы за период с 1900 года, которые регулярно публикуются в Астрономическом ежегоднике.

В качестве характеристики климатической системы выбран океанический индекс инерционности. В разделе 2.4 были представлены зависимости климата от индекса инерционности. Предполагается, что индекс инерционности показывает изменение толщины слоя перемешивания в океане – толщину слоя взаимодействия атмосферы

с океаном. Более точные сведения о слое перемешивания можно получить, если тот же индекс вычислять по данным о температуре поверхности океана, так как температура поверхности океана более тесно связана с толщиной однородного слоя, чем температура воздуха на далеком континенте.

Сезонный ход температуры поверхности океана зависит от вертикального взаимодействия слоев океана. Большую инерционность следует ожидать при увеличении слоя перемешивания, а малую – при ослабленном взаимодействии поверхностных слоев с более глубокими.

По обобщенным данным о температуре поверхности Мирового океана и вычислен ряд индекса инерционности океана (по аналогии с индексом инерционности атмосферы), вычислен тренд и погодичные отклонения от него. На рис. 3.39 отклонения от тренда индекса инерционности температуры поверхности океана сопоставляются с проекцией диссимметрии Солнечной системы.

Проекция вычислена на гелиоцентрическую долготу, которую Земля занимает на орбите в середине лета. В это время года происходит деление годового интервала на две половины при вычислении индекса инерционности (см. описание индекса).

Оказалось, что корреляция между индексом инерционности океана (отклонения от тренда) и проекцией диссимметрии положительная ($R = +0,37$) и статистически достоверная ($P_{\text{сл}} < 5 \%$).

Возможно и прямое сопоставление проекции диссимметрии Солнечной системы с региональной температурой воздуха. На рис. 3.40 показано многолетнее изменение температуры воздуха в Москве зимой и проекции диссимметрии на зимнее положение Земли на орбите. Значения температуры сглажены по скользящим семилетиям.

Колебания температуры согласуются с аналогичными изменениями проекции диссимметрии, но с 1900 по 1970 год корреляция была положительная, $R = +0,49$, а с 1971 года – отрицательная, коэффициент корреляции $R = -0,64$.

3.10. Солнечная активность и инерционность климатической системы

Солнечная активность оценивалась по самому распространенному показателю – числам Вольфа, характеризующим число солнечных пятен. А в качестве характеристики климатической системы выбран океанический индекс инерционности. Океанический индекс инерционности вычислялся по средней температуре поверхности Мирового океана (ежемесячные погодичные данные NCDC). Для сопоставления использовались слаженные по скользящим пятилетиям значения индекса океанической инерционности после исключения линейного тренда.

Совместный анализ среднегодовых чисел Вольфа и океанического индекса инерционности за последние 100 лет показал наличие возмущений в индексе с периодом около 11 лет, известным для солнечных пятен, но за 100 лет обнаруживались интервалы лет с прямой и обратной корреляцией между индексом инерционности и числами Вольфа. В последние 30 лет корреляция установилась отрицательная, коэффициент корреляции $r = -0,64$. На рис. 3.41 видно, что с увеличением числа солнечных пятен океанический индекс инерционности понижается. До 1970 года не было такой согласованности в изменениях солнечной активности и индекса.

Учитывая смену знака корреляций за последние 100 лет, нельзя утверждать, что солнечная активность посредством некоторого прямого механизма воздействует на инерционность атмосферы и океана, но факт их согласованных изменений установлен, и это является поводом для дальнейших исследований.

3.11. Циклы Миланковича

В конце XX века в теории климата важное значение стали придавать циклам Миланковича, которые ранее несколько десятилетий

не признавались. М. Миланкович [55] разработал теорию долгопериодных вариаций орбиты Земли и изменений в распределении инсоляции по земной поверхности. Под влиянием конфигурации планет существует долгопериодическая нутация – колебания угла наклона земной оси к плоскости ее орбиты с периодом около 41 000 лет. Влияние прецессии и нутации приводит к колебаниям наклона земного экватора относительно плоскости земной орбиты. С периодом около 93 000 лет происходят изменения эксцентриситета орбиты Земли. Ранее было сказано о прецессии земной оси с периодом 25800 лет. Все три параметра – это важнейшие долгопериодные астрономические основы формирования климата на Земле. М. Миланкович высказал гипотезу о том, что суммарное воздействие перечисленных факторов создает циклы инсоляции, совпадающие с эпохами изменений климата в далеком прошлом. Позднее его расчеты уточнялись, но сходство вычисленных циклов инсоляции с колебаниями климата в далеком прошлом не опровергались.

3.12. Резонансы в Солнечной и климатической системах

Климатическая система во всех ее параметрах проявляется как сложная колебательная система со сложными взаимодействиями.

Вопрос о факторах естественных колебаний климата в конечном счете неизбежно приводит к поиску ответов на основе изучения космических процессов.

Самой ближайшей причиной колебаний климата можно считать, как показано в [38], изменения общей циркуляции атмосферы. Но что послужило причиной этих изменений в циркуляции? Ответ обнаруживается при исследовании температурных полей океана. А что влияет на изменения в аномалиях температуры поверхности океана? Возможно, глубинные процессы в океане, но для этого тоже должны быть свои причины. Ответы на последующие вопросы, видимо, следует искать вне Земли.

Опубликовано много работ, в которых изменения (колебания) климата рассматриваются как результат цикличности солнечной активности, а цикличность солнечной активности, в свою очередь, либо никак не объясняется, либо объясняется резонансным воздействием планетных конфигураций Солнечной системы [13, 64].

Резонансы в Солнечной системе требуют особого изучения, так как они могут рассматриваться в качестве вынуждающих колебаний климатической системы. Гипотеза о резонансной структуре Солнечной системы является частью общей теории поведения сложных колебательных систем, и на ее примере можно получить представление о тех резонансах, которые, возможно, возникают в климатической системе и являются основой ритмов разной длительности и частот, а также причиной долгопериодных изменений в параметрах климатической системы (одной из причин колебаний климата).

Солнечная система состоит из центрального светила Солнца, девяти планет и их спутников. В движениях планет обнаружены строгие закономерности, описываемые законами движения Кеплера. Эти закономерности движений планет и спутников объясняются взаимодействиями по закону всемирного тяготения. Однако наклоны плоскостей орбит и их эксцентриситеты могли бы быть любыми. Закон всемирного тяготения не накладывает ограничений ни на размеры орбит, ни на направление обращения планет вокруг Солнца. Однако в Солнечной системе орбиты всех планет почти круговые, лежат почти в одной плоскости, близкой к плоскости солнечного экватора. Обращаются планеты вокруг Солнца все в одну сторону, совпадающую с направлением собственного вращения Солнца, а средние расстояния планет от Солнца подчиняются общему закону. Девять больших планет от Меркурия до Плутона и многие их спутники имеют периоды обращения, связанные резонансными соотношениями, строение их орбит задается соотношением целых чисел. Например, частота обращения Юпитера и частота обращения Сатурна вокруг Солнца относятся как 5:2 с небольшим отличием. Ближайшие друг к другу планеты или спутники планет находятся в резонансах друг с другом, отклонение истинных частот от резонансных не превосходит 1,5 %.

Существуют резонансные соотношения между периодом обращения по орбите и периодом вращения планеты вокруг оси.

- Вращение Луны вокруг своей оси и обращение вокруг Земли имеют равные периоды так, что Луна всегда повернута к Земле одной стороной, т.е. период ее обращения вокруг планеты и период обращения вокруг оси связаны резонансом 1:1.
- Период осевого вращения Меркурия составляет 2:3 от его орбитального периода. В результате за один меркурианский год Меркурий успевает повернуться вокруг своей оси на полтора оборота, при каждом прохождении перигелия большая ось планеты оказывается направленной точно на Солнце. В перигелии один из двух противоположных меридианов попеременно обращены к Солнцу.
- Период и направление вращения Венеры таковы, что при каждом соединении Венеры с Землей она всегда повернута к Земле одной и той же стороной.

Такие совпадения трудно назвать случайными.

Гипотеза о резонансной структуре Солнечной системы была высказана А.М. Молчановым в 1966 году. Далее изложение приведено в соответствии с публикацией [74]. Гипотеза относится к общей теории многочастотных нелинейных колебательных систем, а Солнечная система привлекается лишь как объект для приложения содержащихся в гипотезе факторов эволюции в таких системах.

Исаак Ньютон в свое время объяснил законы Кеплера, решив задачу о двух материальных точках, взаимодействующих по закону всемирного тяготения. Возникал вопрос о том, как будет вести себя система, состоящая из нескольких гравитирующих тел. Сам Ньютон считал, что без вмешательства божественных сил порядок и гармония в Солнечной системе были бы разрушены взаимными возмущениями планет. Это противоречило известной устойчивости Солнечной системы. А.М. Молчанов, напротив, считал, что независимо от своей природы нелинейные колебательные системы в ходе динамической эволюции проявляют тенденцию выходить на особый синхронный режим движения. Совокупность изолированных друг от друга объектов,

совершающих колебания с различными частотами, при наложении иногда даже очень слабых связей переходит в такой режим движения, при котором частоты объектов становятся равными, кратными или находящимися в рациональных отношениях. В процессе синхронизации помимо соизмеримости частот устанавливаются также определенные фазовые соотношения между колебаниями. Соизмеримости между частотами – очень частое явление в реальной Солнечной системе. По мнению А.М. Молчанова [74], при изучении эволюции нелинейных колебательных систем следует принимать во внимание всегда существующие в реальных условиях диссипативные силы. Эти силы направлены на погашение взаимодействующих колебаний, хаотических по отношению друг к другу. Но эти же силы приводят к резонансному усилению колебаний, находящихся между собой в рациональных соотношениях. Силы взаимодействий могут быть больше или меньше (от их величины зависит скорость эволюции), от этого зависит скорость выхода системы в стационарный резонансный режим. Конечное стационарное состояние системы, достигаемое к концу эволюции, обязательно должно быть резонансным. Эволюционно зрелые колебательные системы неизбежно резонансны, а их строение задано, подобно квантовым системам, набором целых чисел. В реальном времени диссипативными силами можно пренебречь, но в эволюционном масштабе времени накапливающиеся эффекты малых диссипативных сил становятся определяющими.

Отсутствие строгого доказательства гипотезы не снижает ее научного значения [74], состоящего в том, что для объяснения наблюдаемых в Солнечной системе закономерностей привлечен общий универсальный механизм – механизм синхронизации нелинейных колебательных систем. Климатическая система тоже относится к числу нелинейных колебательных систем. Можно предположить, что законы синхронизации срабатывают и в климатической системе.

Для Солнечной системы эволюционный масштаб времени составляет миллиарды лет [74]. Можно предположить, что для климатической системы эволюционный масштаб времени значительно меньше, учитывая более тесные внешние и внутренние связи.

Механизм синхронизации в природе не вполне понятен, все более ясной становится фундаментальная роль этого механизма в формировании наблюдаемой в природе тенденции к самоорганизации, структурированию и порядку [74]. Так устроен этот мир. Приведенные выше примеры синхронизаций в Солнечной системе ничем нельзя объяснить, кроме резонансов.

Если в ходе эволюции совокупность консервативных и диссипативных сил, действующих в Солнечной системе, привела к синхронному движению планетную систему, то неизбежно этими же силами в общий синхронный режим должны вовлечься и колебательные конвективные процессы на Солнце, которые определяют известную солнечную активность. Поэтому основные характеристики синхронного режима планетной системы находят отражение в циклах солнечной активности [13, 54].

Астрономические параметры Земли задают распределение инсоляции по Земле и являются главным фактором климата планеты. Кроме этого, как было показано в разделе 3.8, динамические изменения параметров Земли сопровождаются сезонными аномалиями температуры океана и атмосферы. Тогда по аналогии с резонансной структурой Солнечной системы малые вариации орбиты Земли и столь же малые внешние воздействия на климатическую систему должны в результате длительной эволюции привести колебательные характеристики климатической системы к некоторому резонансному состоянию, синхронизированному с планетными конфигурациями и циклами солнечной активности. Прежде всего синхронизация должна наступить между циклическими внешними воздействиями и собственными частотами какой-либо одной из составляющих климатической системы или нескольких из них. А далее внутри климатической системы в результате взаимодействий должны установиться колебания на собственных (резонансных) частотах в отдельных ее составляющих.

Такой взгляд на природу колебаний в климатической системе существенно расширяет представления о причинно-следственных

связях, о необходимых физико-математических соотношениях взаимодействий в ней и о влиянии на нее внешних факторов.

Большое значение в климатических исследованиях занимает статистический анализ данных наблюдений. Если в колебаниях составляющих климатической системы действительно существуют резонансные соотношения, установившиеся в результате длительных слабых взаимодействий, тогда необдуманный поиск простых корреляций становится бессмысленным занятием. Резонансы в колебаниях внешних факторов и отдельных составляющих климатической системы могут установиться на множестве возможных соизмеримых частот, а корреляционный анализ позволяет обнаружить зависимости или доказать их отсутствие только на одинаковых частотах колебаний.

А что может помешать резонансной синхронизации внутри климатической системы и между климатической системой и внешними факторами? Обычно полагают, что климатическая система является замкнутой с одним внешним фактором – годовым циклом инсоляции. Годовой цикл в метеорологических параметрах – это простой пример вынужденных колебаний с периодом вынуждающего цикла. Тогда в предположении об отсутствии других внешних факторов все естественные колебания климата с периодами меньше и больше года тоже надо признать производными от годового цикла.

При отсутствии других внешних факторов колебания метеорологических параметров с периодами меньше года следует отнести к затухающим высокочастотным свободным колебаниям климатической системы (на собственных частотах), которые запускаются заново каждый год и каждый год с нулевой фазы. Если такие колебания не успевают затухнуть в течение года, тогда на них неизбежно накладывается новая серия собственных колебаний следующего года. Суммарная картина существенно осложняется. Колебания, периоды которых целое число раз укладываются в интервал одного года, будут резонансно усиливаться, а другие колебания – подавляться. Именно благодаря наличию колебаний, периоды которых целое число раз укладываются в интервал одного года, обнаруживаются известные календарные особенности погоды [89], но они очень слабые.

Нелинейные взаимодействия и положительные обратные связи в климатической системе могут создать основу для низкой частоты собственных колебаний, а запуск и энергетическая поддержка колебаний климатической системы на низких частотах за счет годового цикла инсоляции возможны только при строгой соизмеримости их частот (длительность долгопериодного колебания должна измеряться строго целым числом лет). Опять речь идет о резонансе. В климатической системе нет собственных источников долгопериодных колебаний.

Случай строгой соизмеримости кажется невероятным, но в природе и это возможно, так как не противоречит общим закономерностям Вселенной. Однако более простой вид резонанса кажется и более вероятным – климатическую систему можно вывести из равновесия в многолетнем плане при резонансном воздействии на нее внешних факторов с долгопериодными колебаниями.

Учитывая вышеприведенные доводы, нельзя исключать, что за миллионы лет слабые циклические внешние возмущения могли синхронизировать собственные колебания климатической системы. Синхронизация возникает при избирательной энергетической подпитке колебаний в климатической системе на частотах, соизмеримых с космическими ритмами, включая годовой ход инсоляции.

Если гипотеза о резонансном воздействии внешних факторов на климатическую систему верна, тогда отпадает необходимость поиска прямого энергетического соответствия колебаний внешнего фактора и колебаний климатической системы. Тогда необходимо строить описание резонансных соотношений. Возникает необходимость построения принципиально новых резонансных физико-математических моделей климата.

Исходя из того, что резонансная структура Солнечной системы очевидна, необходимы исследования колебаний климатической системы на предмет их резонансной природы под влиянием слабых возмущений от внешних (космических) факторов. Подкреплением такой гипотезы являются многочисленные свидетельства о статистических связях колебаний климата с внешними факторами при отсутствии энергетически обеспеченных соотношений. Недостаток энергии для прямого воздействия внешнего фактора на климат может заменяться многократным слабым резонансным воздействием.

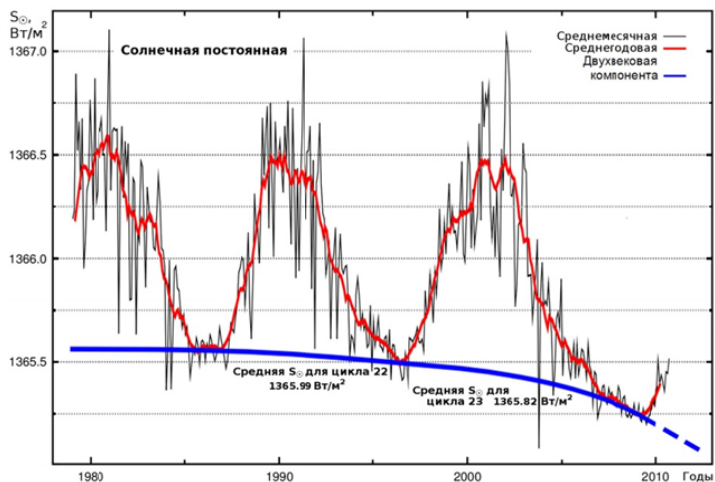


Рис. 3.1. Изменения солнечной постоянной в 11-летнем цикле солнечной активности [1]

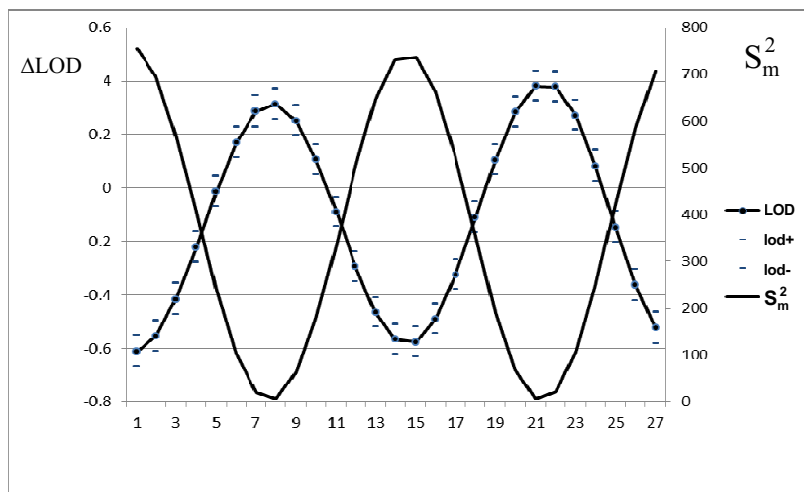


Рис. 3.2. Квадрат склонения Луны S_m^2 и изменение продолжительности суток ΔLOD (в 0,001 с), полученные методом наложения эпох, в котором момент $t = 0$ – момент наибольшего склонения за полный оборот Луны вокруг Земли: $lod+$ и $lod-$ – среднеквадратические отклонения от точек ΔLOD на графике

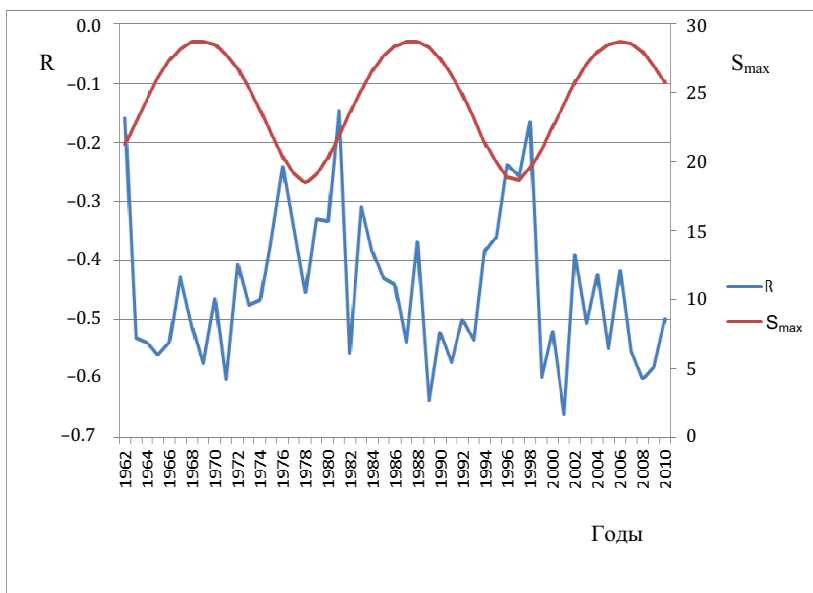


Рис. 3.3. Коэффициент корреляции R между аномалиями продолжительности суток и квадратом склонения Луны по годам, а также максимальное за год склонение Луны $S_{\max}$ по годам

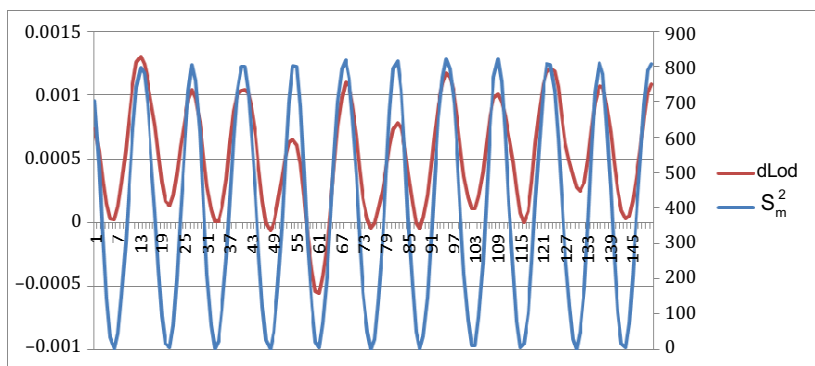


Рис. 3.4. Квадрат склонения Луны (S_m^2) и аномалии продолжительности суток ($dLOD$) в 1987 году

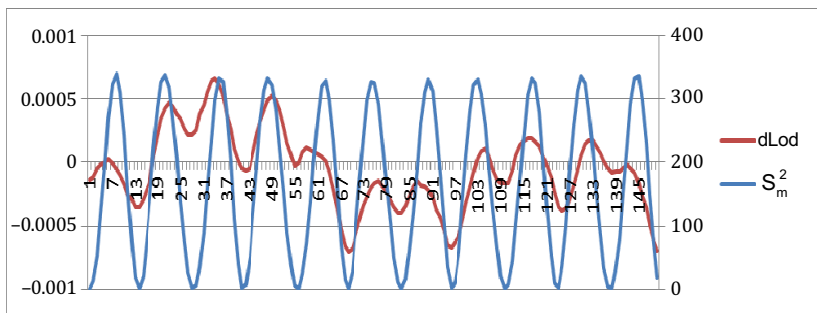


Рис. 3.5. Квадрат склонения Луны (S_m^2) и аномалии продолжительности суток (dLOD) в 1997 году

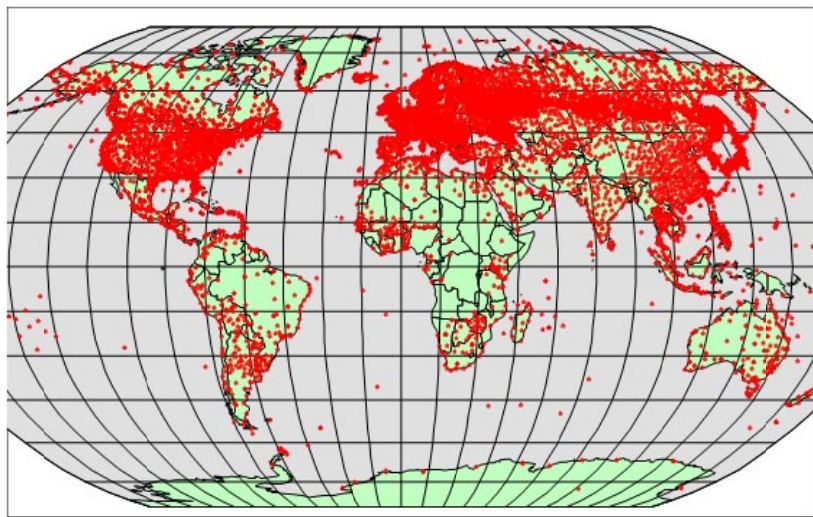


Рис. 3.6. Метеорологические станции

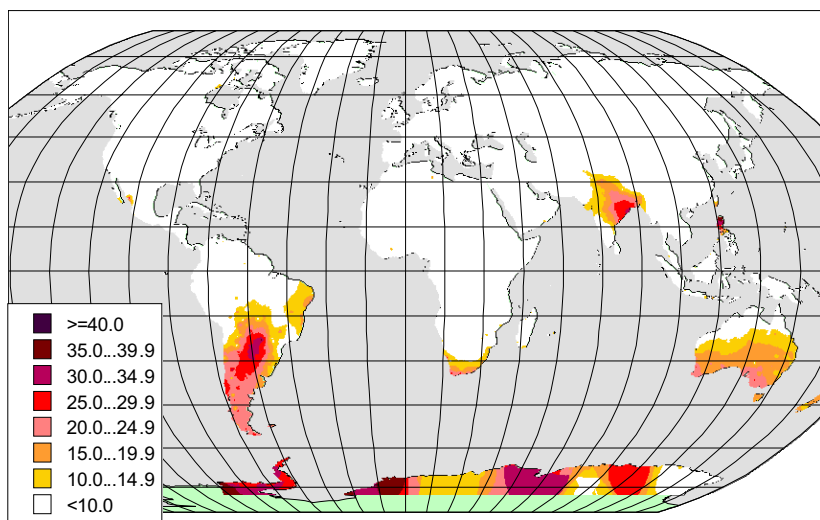


Рис. 3.7. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 12-й

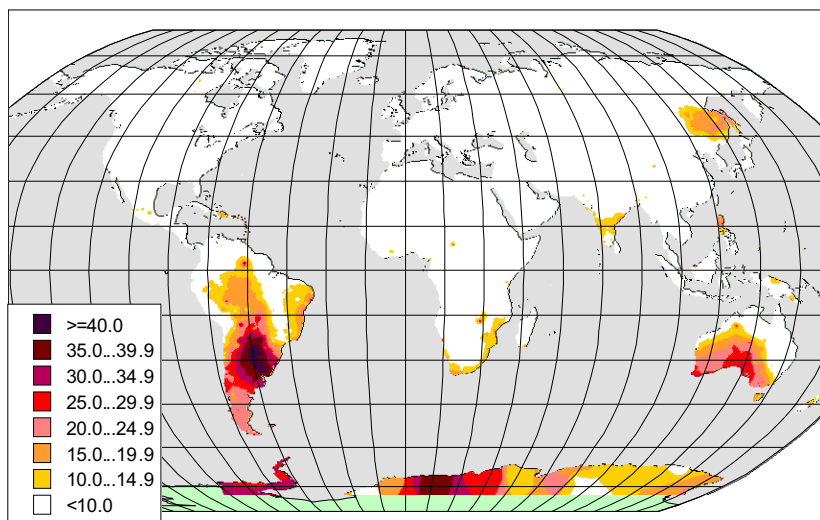


Рис. 3.8. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 13-й

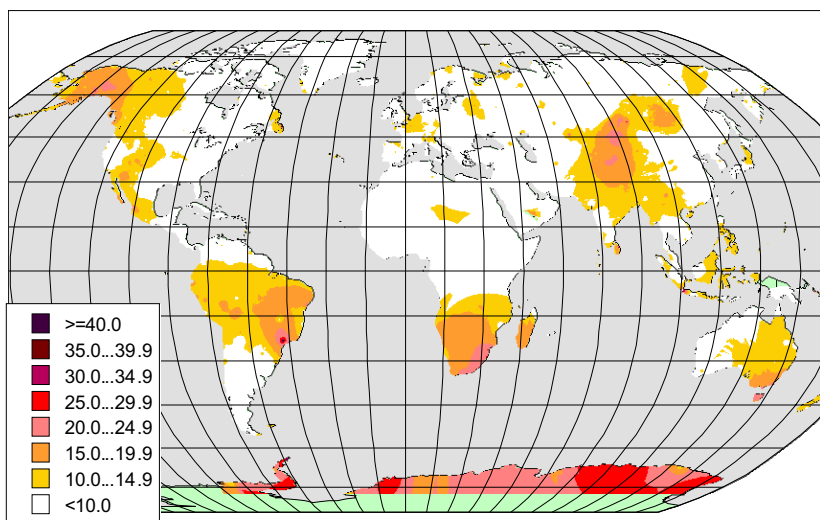


Рис. 3.9. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 1-й

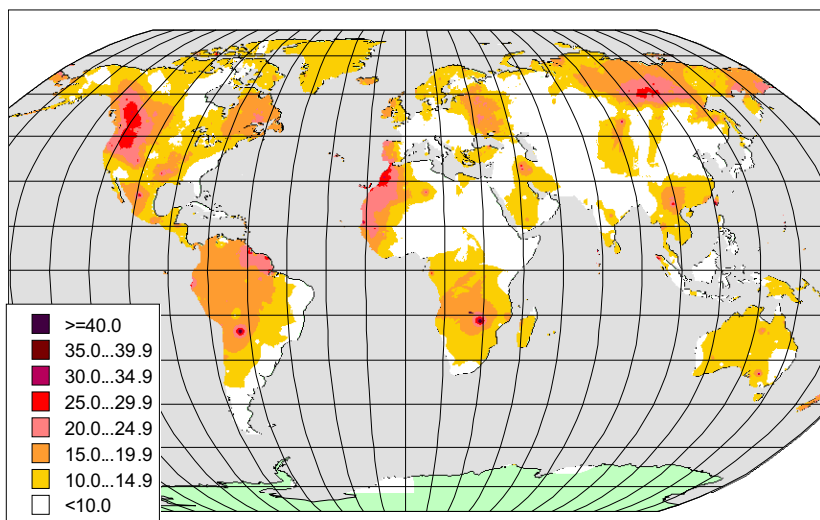


Рис. 3.10. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 2-й

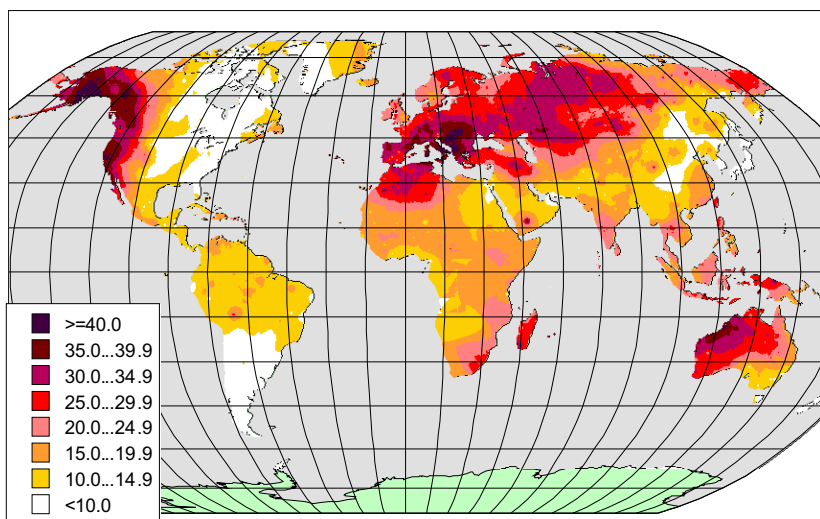


Рис. 3.11. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 3-й

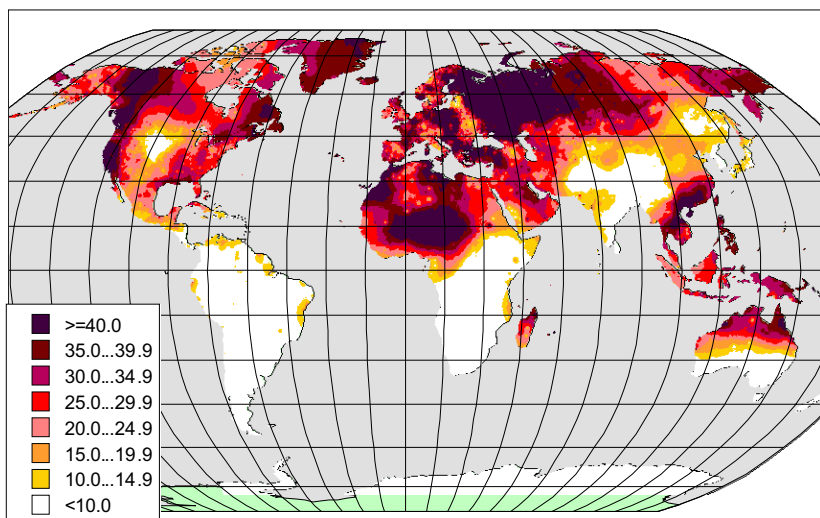


Рис. 3.12. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 4-й

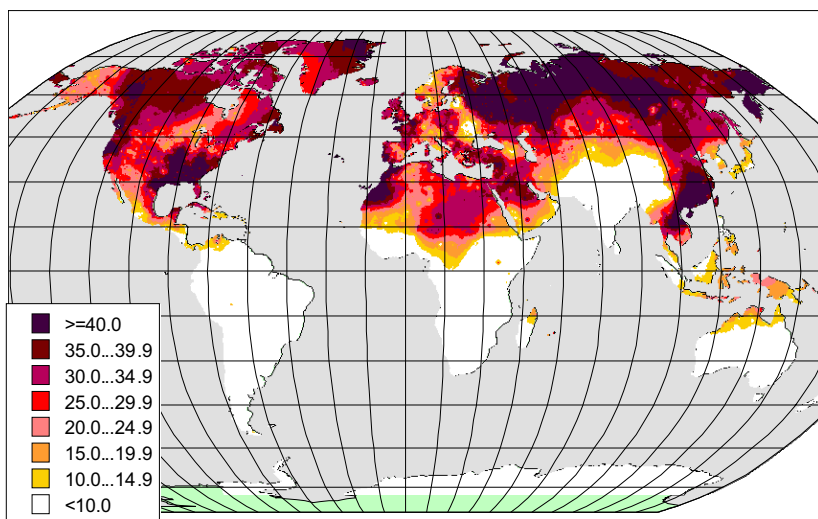


Рис. 3.13. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 5-й

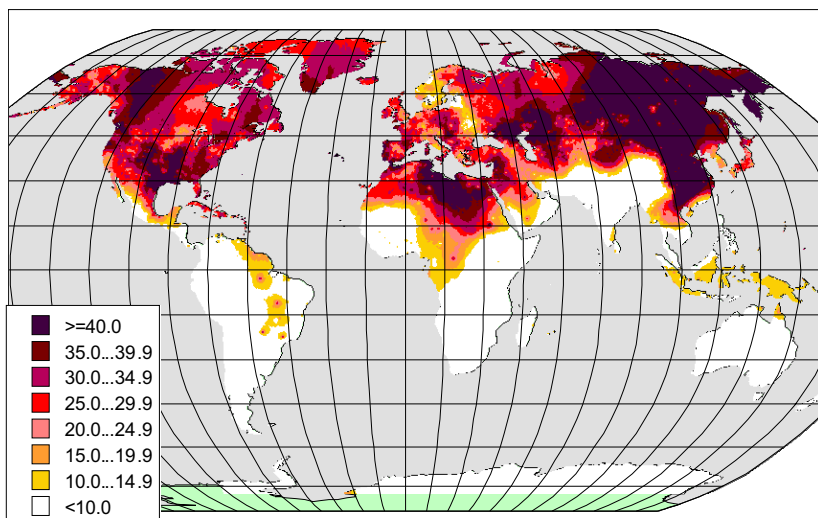


Рис. 3.14. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 6-й

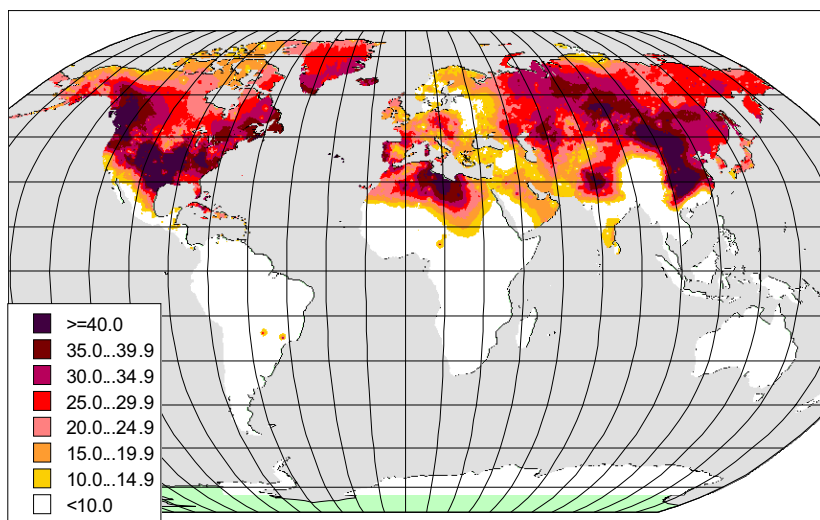


Рис. 3.15. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 7-й

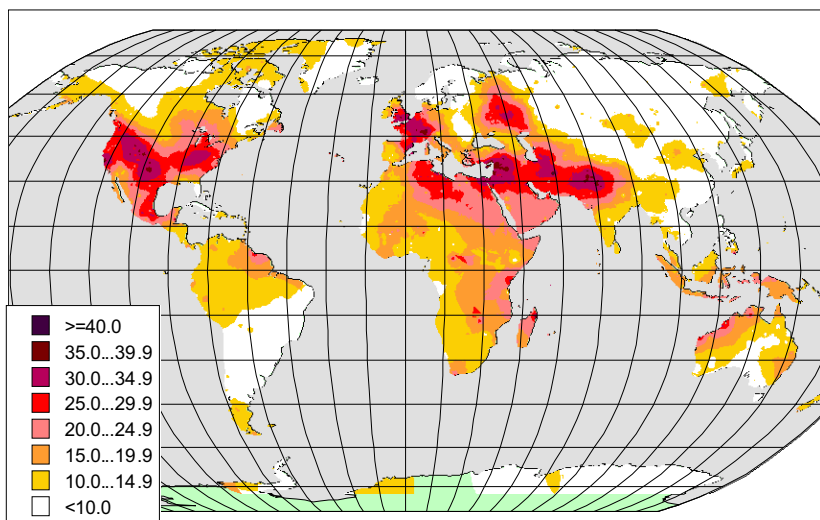


Рис. 3.16. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 8-й

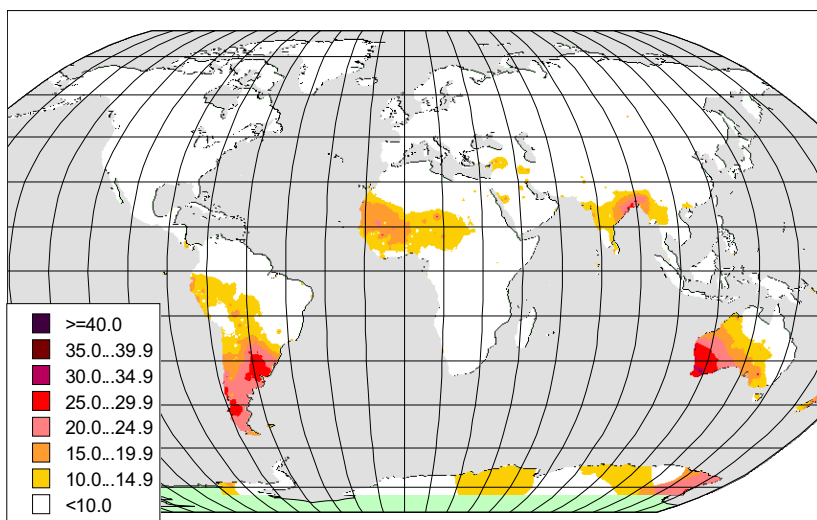


Рис. 3.17. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 9-й

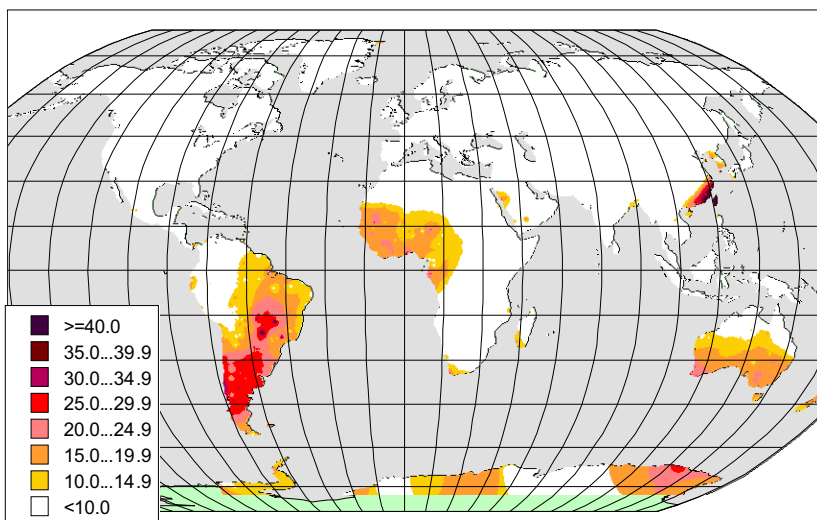


Рис.3.18. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 10-й

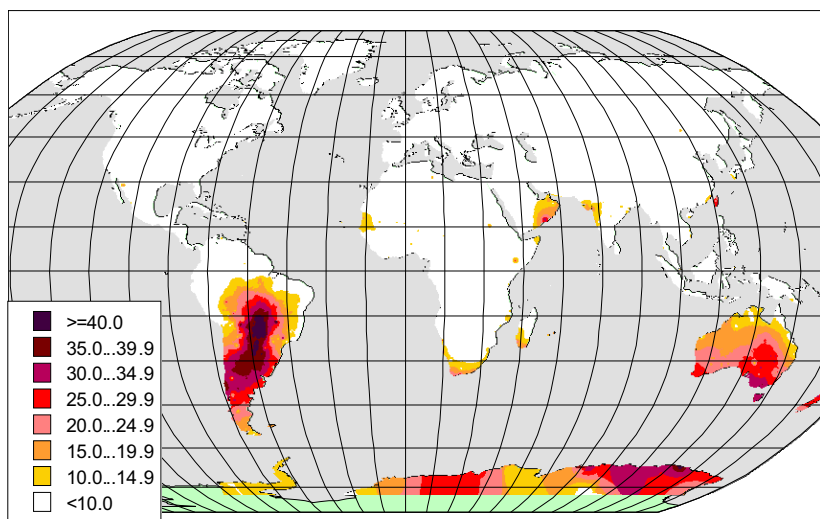


Рис. 3.19. Вклад склонения Луны в общую дисперсию атмосферного давления (%). Лунный месяц 11-й

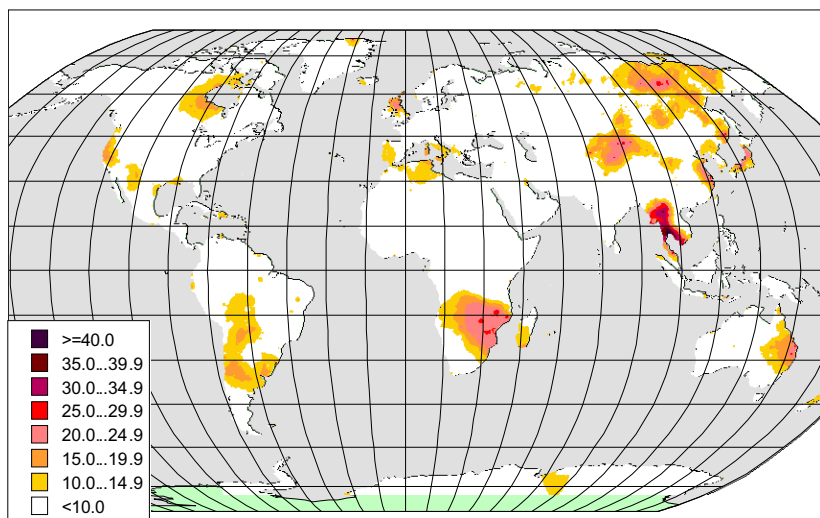


Рис. 3.20. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 1-й

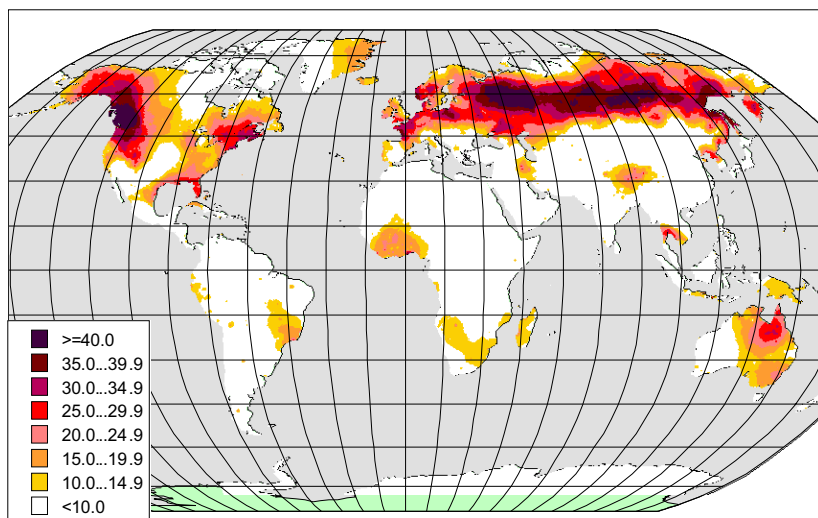


Рис. 3.21. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 2-й

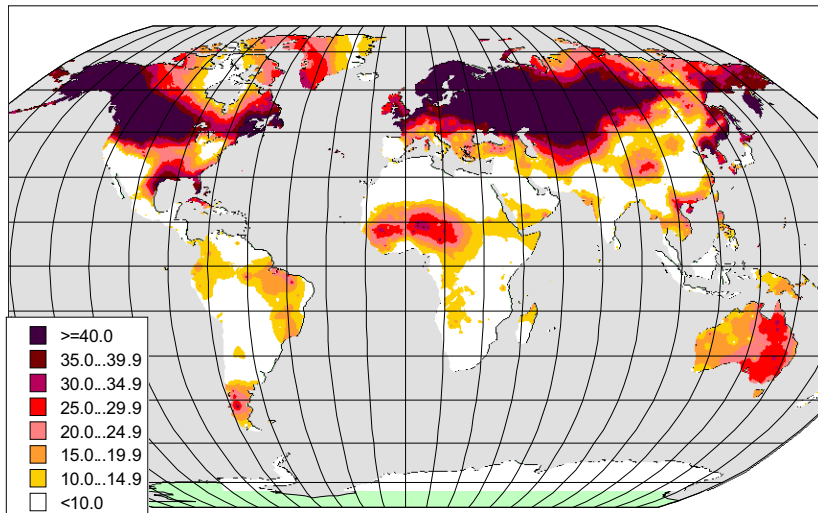


Рис. 3.22. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 3-й

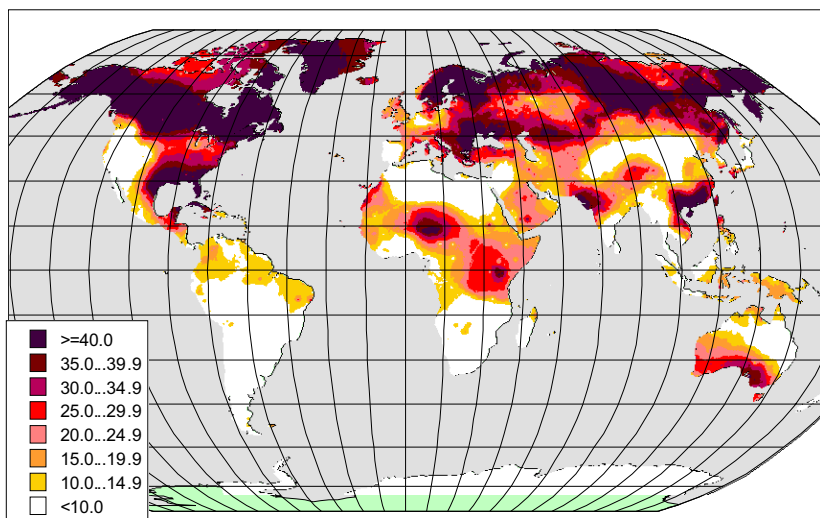


Рис. 3.23. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 4-й

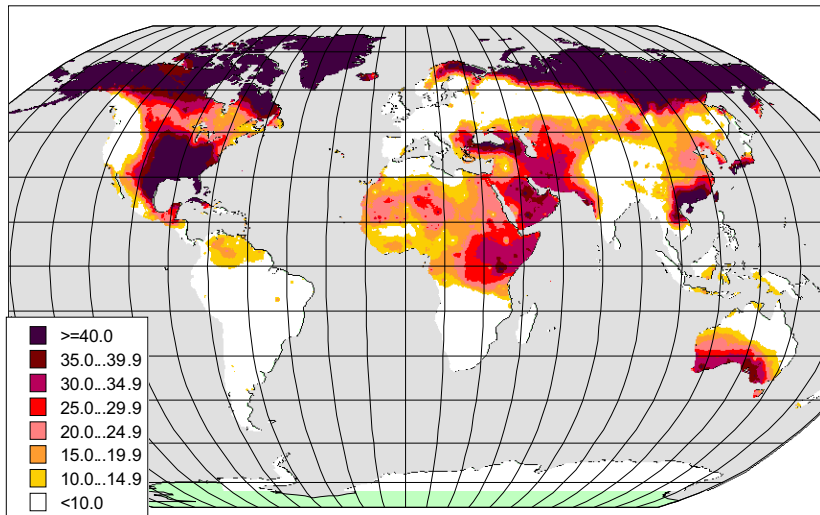


Рис. 3.24. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 5-й

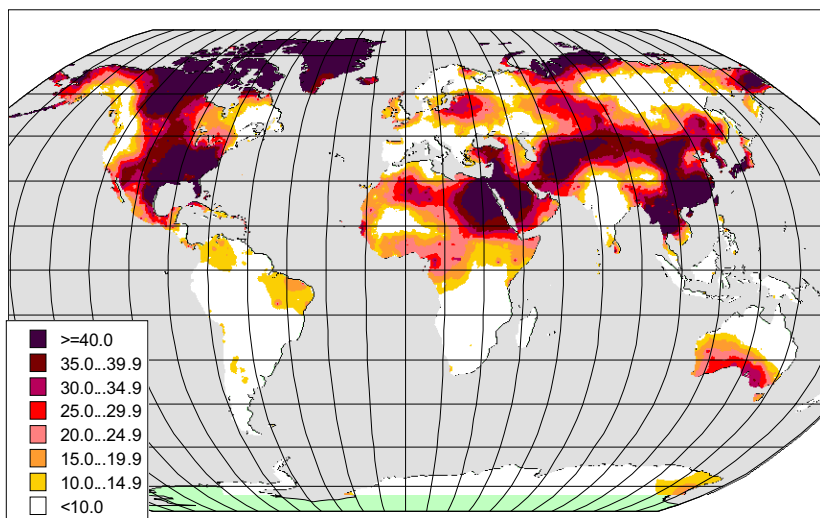


Рис. 3.25. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 6-й

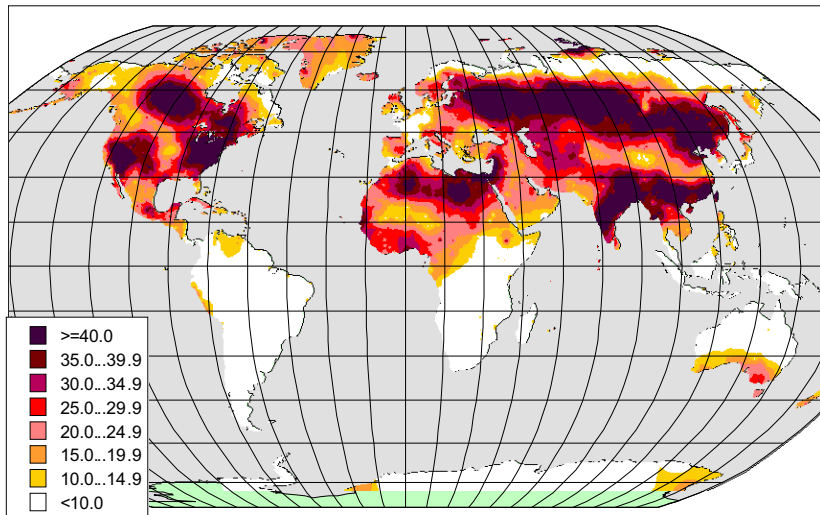


Рис. 3.26. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 7-й

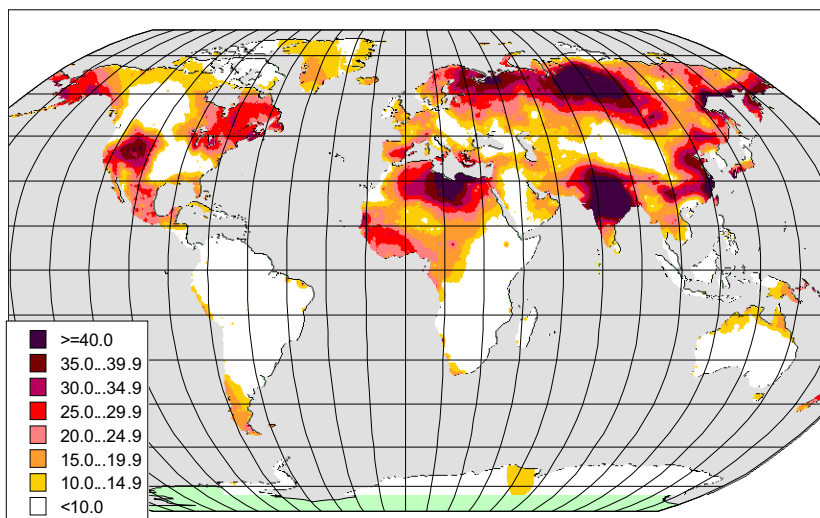


Рис. 3.27. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 8-й

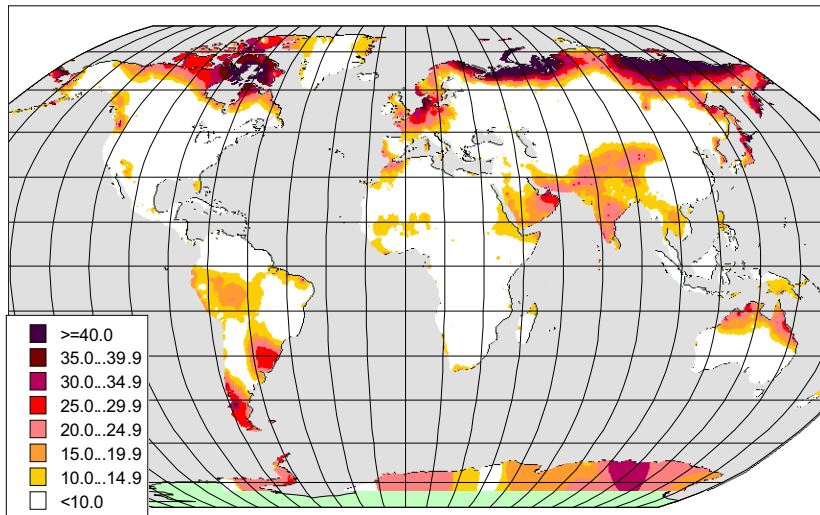


Рис. 3.28. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 9-й

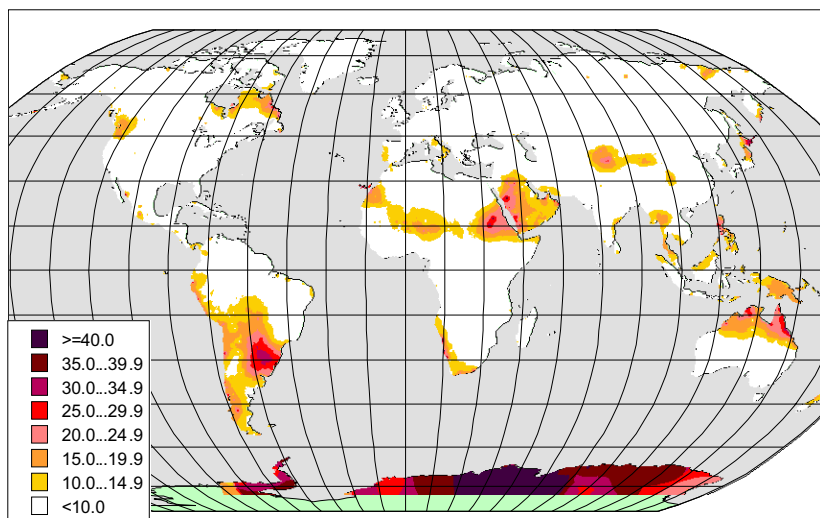


Рис. 3.29. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 10-й

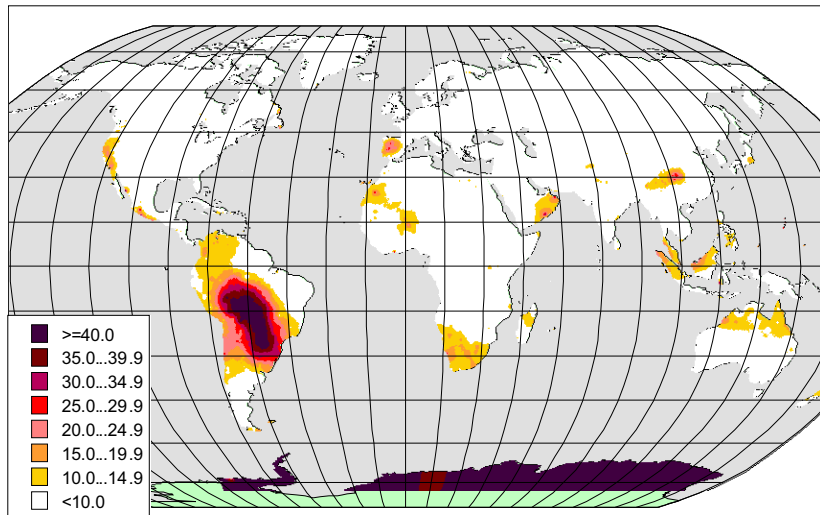


Рис. 3.30. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 11-й

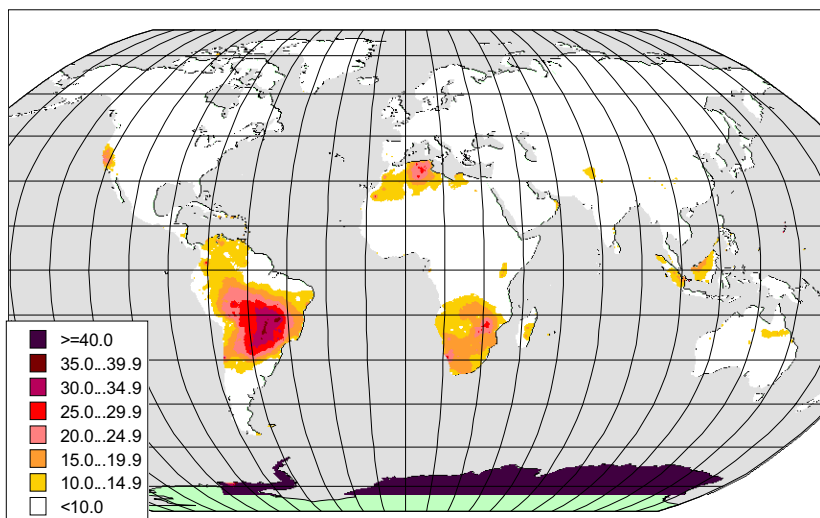


Рис. 3.31. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 12-й

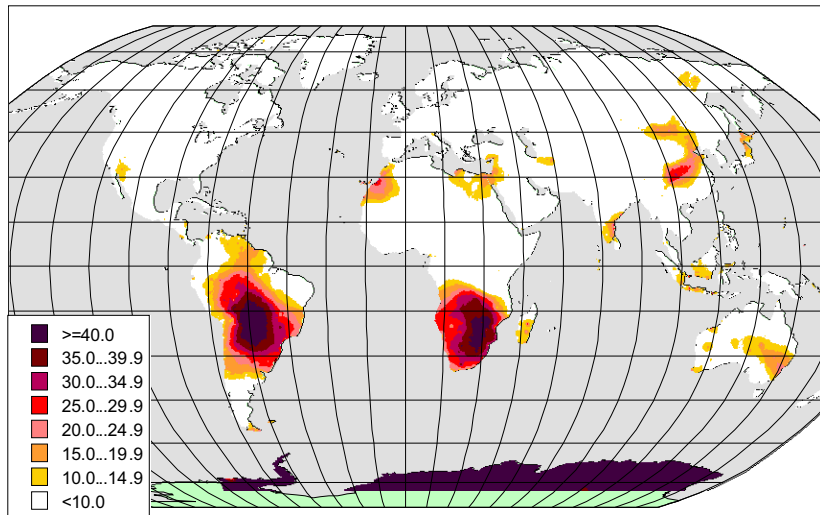


Рис. 3.32. Вклад склонения Луны в общую дисперсию аномалий температуры воздуха (%). Лунный месяц 13-й

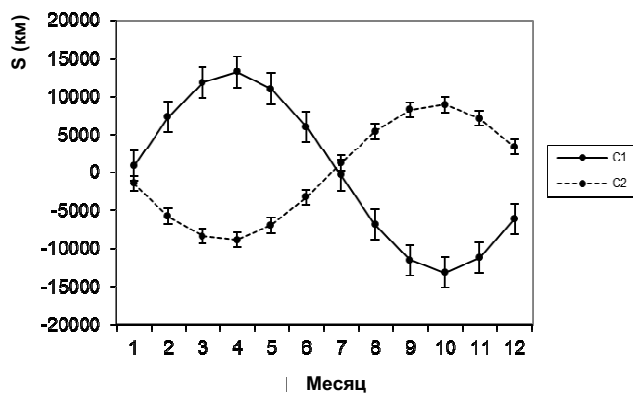


Рис. 3.33. Аномалии расстояния Солнце–Земля: C1 – выборка 1920–1954 гг.; C2 – выборка 1964–1999 гг.

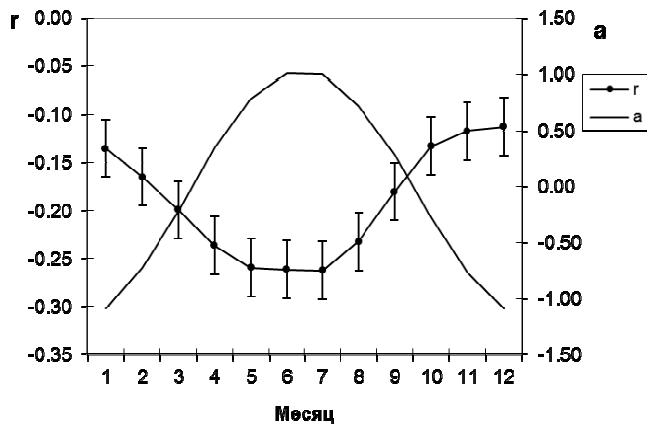


Рис. 3.34. Северо-южное ускорение (а) движения Земли и радиус-вектор (r) полюса Земли за 1920–1954 гг.

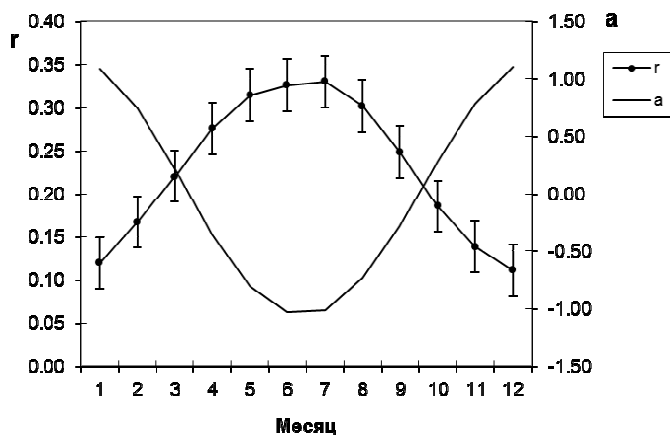


Рис.3.35. Северо-южное ускорение (а) движения Земли и радиус-вектор (r) полюса Земли за 1964–1999 гг.

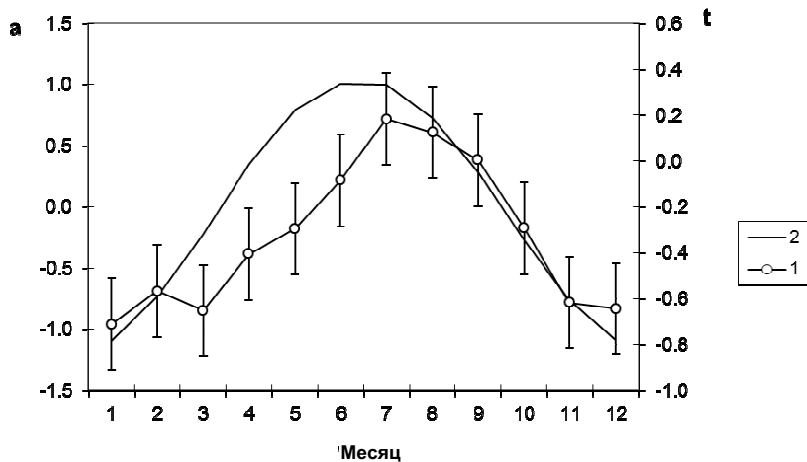


Рис. 3.36. Северо-южное ускорение движения Земли (2) и температура воздуха (1) в зоне 0–60 °с.ш. Земли за 1922–1954 гг.

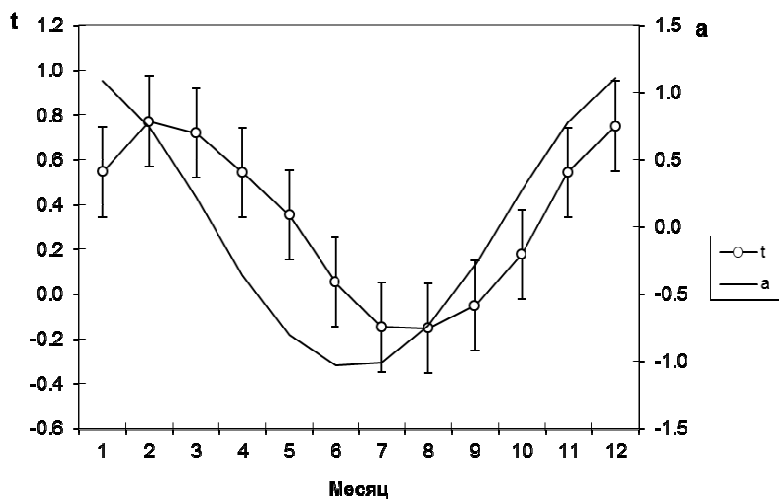


Рис. 3.37. Северо-южное ускорение движения Земли (2) и температура воздуха (1) в зоне 0–60 °с.ш. Земли за 1964–1999 гг.

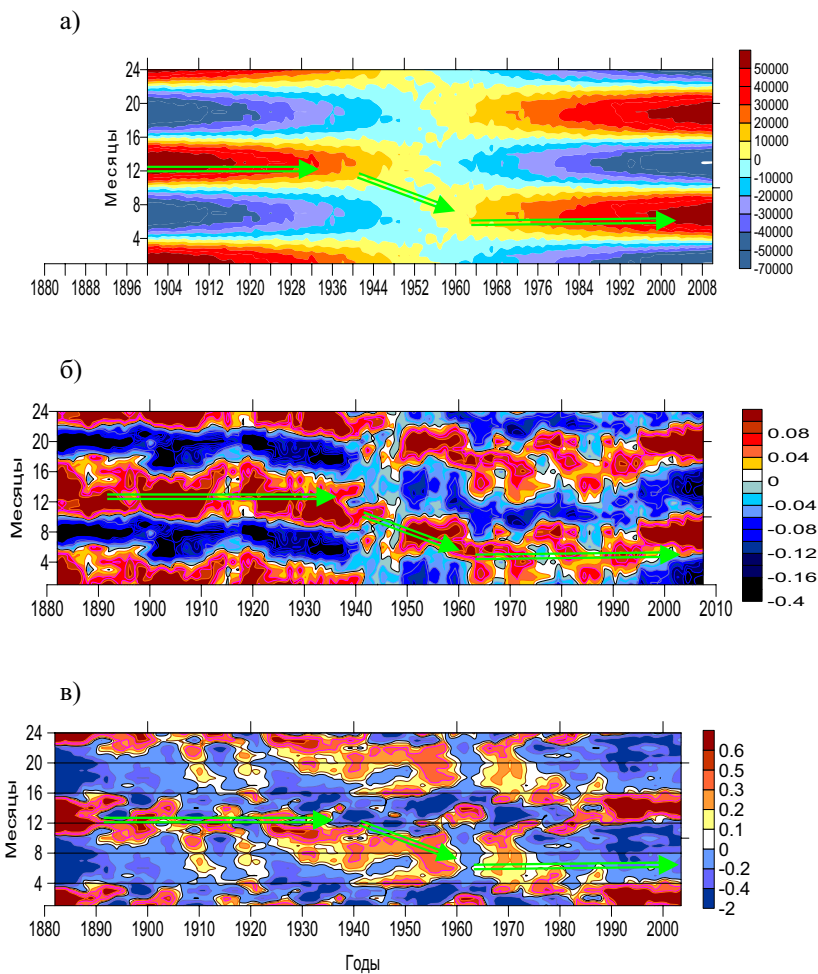


Рис. 3.38. Аномалии северо-южного ускорения Земли (а), температуры поверхности океана (б) и температуры воздуха над континентами (в) в широтной зоне 45–70° Северного полушария

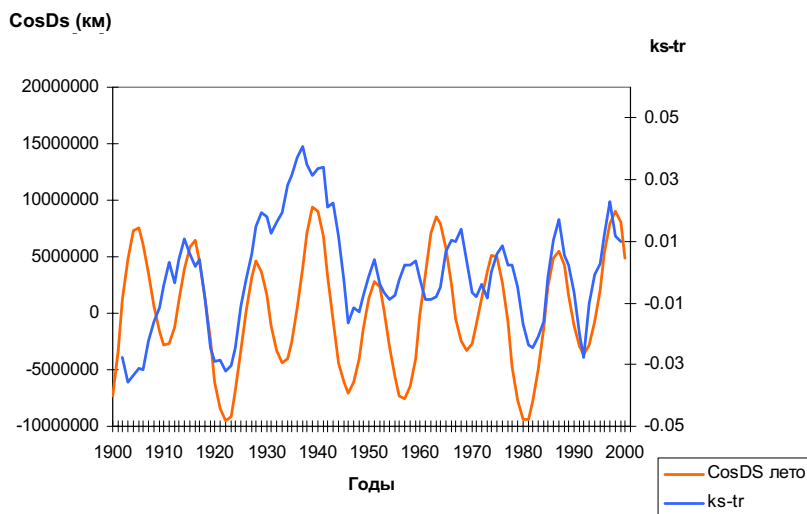


Рис. 3.39. Индекс инерционности поверхности океана (сглаженные по семилетиям значения после исключения тренда (ks-tr) и проекция диссимметрии Солнечной системы (CosDs).

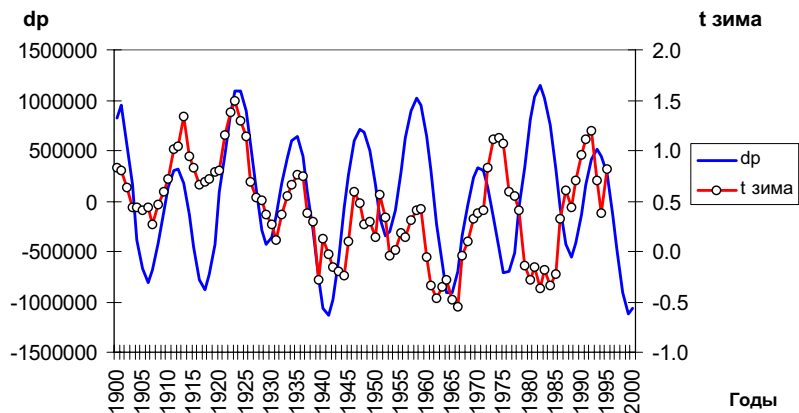


Рис. 3.40. Аномалии температуры (t зима) воздуха (сглаженные по семилетиям) и проекция на Землю диссимметрии Солнечной системы (dp). Москва, декабрь–февраль.

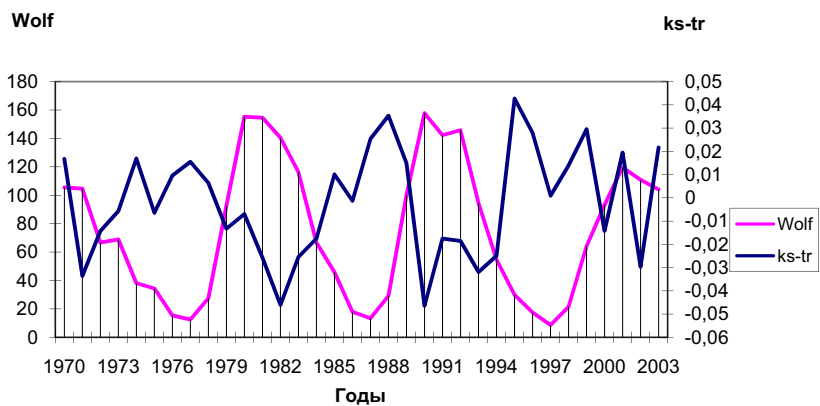


Рис. 3.41. Числа Вольфа и отклонения от тренда индекса инерционности океана (сглаженные по скользящим пятилетиям)

Глава 4. Парниковый эффект в изменениях климата

4.1. Парниковые газы антропогенного происхождения

С заявлением Международной группы экспертов по изменению климата МГЭИК [96] о преобладающей роли в современном глобальном потеплении антропогенного повышения концентрации CO_2 и усиления парникового эффекта трудно согласиться безоговорочно, так как выводы были основаны на модельных оценках с большой долей неопределенности. Проблемы моделей будут рассмотрены в следующей главе, а пока приведем результаты исследования парникового эффекта, выполненные на эмпирических данных.

Если современное потепление климата является следствием антропогенного изменения состава атмосферы (накопление парниковых газов), то исследования необходимо проводить с привлечением данных о радиационном балансе атмосфера–земля. Мы не можем проводить эксперименты с атмосферой, поэтому необходимо воспользоваться теми «экспериментами», которые сама климатическая система нам предоставляет. Проследить за результатами таких «экспериментов» можно на основе знаний о физико-географических условиях изменения радиационного баланса. Подробнее об этом будет написано в последующих разделах.

Из всех парниковых газов наиболее значительное влияние на климат может оказывать рост концентрации CO_2 в результате сжигания возрастающего количества угля, нефти и других видов топлива. Так как углекислый газ почти прозрачен для приходящей солнечной радиации, но заметно ослабляет уходящее длинноволновое излучение, то он является одним из факторов, создающих парниковый эффект в атмосфере.

Существуют природный углекислый газ, возникающий при вулканических извержениях, и антропогенный. Их распределение в атмосфере невозможно разделить. Избыток атмосферной углекислоты частично растворяется в Мировом океане. Углекислота участвует в биогеохимическом цикле, усваивается организмами и, в конце концов, откладывается в донных осадках. На суше избыток углекислоты также откладывается при образовании лесов в соответствующих континентальных ландшафтах. В настоящее время океаны и суша поглощают примерно половину количества антропогенных выбросов CO_2 . Тем не менее концентрация CO_2 в атмосфере повышается и, согласно прогнозу, будет повышаться в будущем.

На рис. 4.1. показаны фактическая концентрация CO_2 до 2000 года и ее прогноз до 2100 года по двум возможным сценариям техногенного развития общества [29]. Согласно моделям, в то время, когда концентрация CO_2 в атмосфере будет возрастать, океан и суша будут поглощать все меньшую долю антропогенных выбросов CO_2 . Влияние обратных связей между климатом, сушей и океаном, как показывают модели, будет заключаться в дальнейшем повышении концентраций CO_2 в атмосфере в результате уменьшения поглощения CO_2 океанами и сушей. Способность газов растворяться в воде зависит от температуры воды, при повышении температуры океана уменьшится количество оттока CO_2 из атмосферы в океан.

Несмотря на большое сходство реальных изменений климата и прогнозов антропогенных температурных изменений, появляются работы, в которых высказываются сомнения об антропогенности изменений климата и утверждается, что парниковая роль CO_2 не так уж велика.

Индустриализация человечества приводит к усилению выбросов в атмосферу не только CO_2 , но и аэрозолей. Аэрозоли представляют собой второе по степени важности антропогенное воздействие на климат, но другого знака. В результате отражения солнечного света обратно в космос большинство аэрозолей способствуют локальному охлаждению климата. Частицы аэрозолей могут непосредственно задерживать проникновение солнечных лучей в нижнюю атмосферу и могут служить

катализаторами (ядрами конденсации), способствующими формированию облаков, которые в теплое полугодие также обладают охлаждающим эффектом. Пока не в полной мере ясна чувствительность климата как к антропогенным концентрациям парниковых газов, так и к аэрозолям. Парниковые газы и аэрозоли оказывают воздействие на климат с разным знаком, эффективность антропогенного CO_2 всегда выше, чем антропогенных аэрозолей. При построении моделей климата под парниковым эффектом обычно понимают результат их совместного воздействия на климат.

В последние годы все больше внимания придается метану, который также является парниковым газом, и по его концентрации в воздухе он стоит на втором месте после углекислого газа. Метан поступает в атмосферу при поверхностных и подводных вулканических извержениях. Другим важным источником поступления метана в атмосферу являются озерно-болотные системы, занимающие огромную территорию, и тундровые ландшафты. Дополнительную долю в поставке метана в атмосферу вносят заболоченные леса на побережьях тропических морей. Кроме того, метан медленно фильтруется в районах близкого расположения к земной поверхности нефтегазовых месторождений. Общее количество такого метана подсчитать в настоящее время не представляется возможным, но вклад этого природного источника метана значителен.

В огромных объемах метан и другие легкие углеводороды выделяются в процессе добычи нефти и особенно газов. Особенно много метана и других углеводородов может улетать в воздушное пространство во время переработки нефти на нефтехимических предприятиях. Примерный подсчет показывает, что только при нефте- и газодобыче, транспортировке и переработке жидких и газообразных горючих полезных ископаемых в атмосферу выбрасывается такое количество метана, которое сопоставимо с природными выбросами этого газа [43].

Много метана выделяется в результате сельскохозяйственной деятельности человека. Большое количество метана образуется при разложении навоза. А рисовые поля фактически являются болотами

искусственного происхождения. Таким образом, в результате хозяйственной деятельности человека уровень антропогенного добавления в атмосферу метана не только сопоставим с природным, но и в ряде случаев оказывается даже выше [43]. Кроме того, метан в связанном состоянии находится в виде метангидрата, который в больших количествах обнаруживается в морских отложениях в арктических областях. Метангидрат представляет собой молекулы метана, каждая из которых окружена водными молекулами. Метангидрат возникает под давлением, он устойчив в водных глубинах ниже чем 300 метров. Полярный холод позволяет формирование метангидрата на малых глубинах. В больших количествах метангидрат заморожен в почву в зоне вечной мерзлоты, которая под действием повышения температуры воздуха оттаивает, и метан освобождается. Парниковый эффект усиливается, это еще больше повышает температуру. Возникает система с обратной положительной связью, которая также приводит к ускорению глобального потепления. За последние два столетия под воздействием человека концентрация метана в атмосфере увеличилась больше чем в 2 раза. Метан, попадая в атмосферу в приземных условиях, не преобразуется, не усваивается организмами, не переходит в осадок и не уходит обратно в недра Земли, а благодаря своей легкости и подвижности быстро поднимается в стратосферу. Под действием солнечной радиации он постепенно разлагается. Метан – сильный парниковый газ, его способность поглощать инфракрасное излучение в 21 раз выше, чем у углекислого газа (на единицу массы), и потому учет роста его концентрации чрезвычайно важен [43].

4.2. Условия проявления парникового эффекта

Вообще, парниковый эффект вызывается водяным паром, углекислым газом, метаном, закисью азота и рядом других менее значительных газов, входящих в состав атмосферы. Мы можем наблюдать только их суммарный эффект. Однако можно выбрать условия, при которых

роль водяного пара не велика, и таким образом выделить влияние на климат других парниковых газов. Суть парникового эффекта по определению заключается в некотором сдвиге радиационного баланса системы земная поверхность – атмосфера в положительную сторону. Концентрация парниковых газов в атмосфере определяется как природными, так и антропогенными факторами. Влияние на климат всех факторов, естественных и антропогенных, выражается единой и измеряемой величиной – радиационным прогревом атмосферы (Вт/м^2). Из публикаций известно, что повышение концентрации в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения привело к прогреву атмосферы на $2,2\text{--}2,7 \text{ Вт/м}^2$. В целом, приходящая солнечная радиация (342 Вт/м^2) почти равна сумме радиации, отраженной атмосферой (107 Вт/м^2) и исходящей от Земли длинноволновой радиации (235 Вт/м^2). По порядку величины нарушение, вызванное антропогенной деятельностью, составляет менее 3 Вт/м^2 или менее 1 % от общего баланса [29, 30]. Однако следует учитывать, что парниковый эффект влияет только на уходящую радиацию и не влияет на приходящую. Изменение уходящей радиации в среднем на 1 % приводит к изменению радиационного баланса на 1 %. Но соотношение между приходящей и уходящей радиацией сильно меняется в зависимости от естественных причин – сезона года, географической широты и времени суток. В этом и состоит природный «эксперимент», который поможет оценить роль парникового эффекта в современном потеплении климата.

На рис. 4.2 показано среднее сезонно-широтное распределение радиационного баланса, полученное по данным измерений на 80 станциях РФ за 1996–2004 годы.

По горизонтальной оси на рис. 4.2 отложены номера месяцев от января (1) до декабря (12), а по вертикальной оси – географическая широта.

Несмотря на небольшое количество станций, сезонно-широтное распределение радиационного баланса демонстрирует его известные особенности. Наибольший радиационный баланс наблюдается в летние месяцы в средних широтах (в РФ нет низкоширотных станций). В зимние месяцы радиационный баланс отрицательный севернее 50°с.ш. , сезонный интервал с отрицательным радиационным балансом расширяется с

увеличением географической широты. Такие закономерности справедливы для всего Северного полушария Земли.

Летом в низких и средних широтах днем радиационный баланс принимает наибольшие положительные значения. Температурный режим атмосферы в этих условиях определяется преимущественно количеством приходящей радиации, относительное значение количества уходящей радиации при этом минимально. Изменение на 1 % этой малой величины составляет очень малую долю в радиационном балансе атмосферы в указанных условиях. На температурный режим при таких условиях парниковый эффект может оказать только минимальное влияние. Другие условия складываются, когда приток солнечной радиации минимальный или отсутствует. В этом случае радиационный баланс мал или отрицательный (высокие широты, зима, ночь), а температурный режим почти полностью определяется количеством уходящей радиации. Любая, даже малая, задержка уходящей радиации в таких условиях напрямую будет отражаться в температурном режиме.

Таким образом, априори можно ожидать, что при прочих равных условиях антропогенное потепление должно быть сильнее при малом или отрицательном радиационном балансе (высокие широты, зима, ночь). Все известные факты о потеплении климата не противоречат этому. Однако при таких же условиях наиболее эффективными должны быть все парниковые газы, включая основной из них – водяной пар.

Приведем несколько известных примеров. Несмотря на то, что рост средней глобальной температуры составил 0,6–0,7 °C за столетие, во многих северных регионах, где преобладает низкая высота Солнца над горизонтом и радиационный баланс часто отрицательный, особенно в Арктике, потепление сильнее и составило несколько градусов. Кроме того, рост температуры сильно неравномерен по сезонам. Для зимних и весенних месяцев в Северной Америке, Западной Европе, Восточной Сибири в среднем за последние 30 лет потепление составляет более 1 °C за десятилетие. В ряде мест зимние потепления составили 5 °C и более [81]. Зимой малая высота солнца над горизонтом формирует радиационный баланс около нуля или отрицательный.

Известно, что потепление климата сильнее проявилось в росте минимальных (ночных) температур, чем в росте максимальных дневных значений [104]. Ночью нет притока прямой солнечной радиации, радиационный баланс отрицательный. Еще известно, что радиационный баланс атмосферы над континентами в среднем ниже, чем над Мировым океаном, и известно, что над континентами потепление климата сильнее, чем над океанами [29]. И в этом случае потепление климата согласуется с условиями радиационного баланса, при которых парниковый эффект может быть наиболее заметен.

Во всех перечисленных случаях потепление климата более отчетливо проявилось там и тогда, когда в силу физико-географических причин радиационный баланс отрицательный или около нуля.

Для проверки зависимости трендов температуры от сезона года и географической широты в работе [88] был выполнен объективный анализ трендов температуры за 1976–2005 гг. на станциях Северного полушария по отдельным месяцам года. Оказалось (см. рис. 4.3), что чаще всего положительные тренды температуры наблюдались зимой на 45–55 °с.ш., в конце зимы – начале весны на 55–60 °с.ш., в конце весны положительные тренды температуры наблюдались на 65–70 °с.ш., а осенью на 45–50 °с.ш. На рис. 4.4 указаны количественные значения повторяемости (%) положительных трендов температуры на разных широтах и показаны стрелками широтно-сезонные перемещения наиболее частых случаев с положительными трендами. Стрелки показывают, что чем теплее сезон, тем все севернее отодвигаются области с положительными трендами температуры от 45–55 °с.ш. зимой к 65–70 °с.ш. в конце весны. Осенью опять области положительных трендов опускаются на 45–50 °с.ш.

На рисунке 4.5 приведено распределение прямой солнечной радиации на верхней границе атмосферы (Вт/м^2) в разные сезоны в зависимости от географической широты места. На этот рисунок нанесены упомянутые выше области наиболее частых появлений положительных трендов температуры воздуха (зима – 45–55 °с.ш., зима–весна – 55–60 °с.ш., конец весны – 65–70 °с.ш., осень – 45–50 °с.ш.). Оказалось, что во всех случаях положительные тренды чаще встречаются при

очень низком уровне приходящей солнечной радиации около 150 Вт/м^2 . Это условия, когда преобладает уходящая радиация и радиационный баланс отрицательный. Опять потепление климата более отчетливо проявилось там и тогда, когда в силу физико-географических причин радиационный баланс отрицательный или около нуля. Обнаруженная зависимость трендов температуры от радиационных потоков подтверждает усиление парникового эффекта. Но какого? В атмосфере самым парниковым газом является водяной пар. Аналогичным еще большим эффектом обладает облачность. Начнем с анализа трендов, связанных с облачностью.

4.3. Сезонный ход радиационного баланса, трендов температуры воздуха, количества облачности

Проведем целенаправленное исследование «экспериментов», поставленных природой с привлечением данных наблюдений.

В России количество станций с актинометрическими наблюдениями во много раз меньше сети метеорологических станций, поэтому для прямого сопоставления температурных трендов на всех станциях с радиационным балансом нет возможности. Но радиационный баланс имеет хорошо выраженный годовой и широтный ход, это позволяет обосновать анализ особенностей изменения климата всей России в обобщенном виде с детализацией только по географическим широтам или по годовому ходу. При этом значительно ослабляются «шумы» местных особенностей, а результаты сопоставления с распределением радиационного баланса приобретают четкий физический смысл. На основе такого анализа попытаемся отделить парниковые эффекты облачности и влажности в атмосфере от других парниковых составляющих.

Для расчетов использовались восьмисрочные данные о температуре воздуха, относительной влажности и о количестве общей облачности по 1600 станциям России за 1976–2005 гг., а также данные о радиационном балансе за 1996–2004 гг. на 80 гидрометеорологических станциях России, проводящих актинометрические наблюдения.

Обычно годовой ход температуры анализируют по месячным данным, а в настоящей работе анализ проводится по средним пятисуточным (пентадным) значениям. По каждой метеорологической станции за 1976–2005 гг. были получены погодичные пентадные значения температуры путем осреднения данных по пяти суткам. Пентадам присвоены номера от единицы в начале года до № 73 в конце декабря. За тридцать лет по каждой пентаде с заданным номером составлялся ряд среднепентадной температуры воздуха. Таким образом, по каждой станции построено 73 тридцатилетних ряда, каждый из которых описывает многолетние изменения в заданном узком (пятидневном) интервале года. Так, например, ряд первой пентады характеризует многолетний ход температуры воздуха средней за 1–5 января. Первые шесть рядов детально характеризуют январские многолетние изменения температуры, следующие ряды характеризуют многолетние изменения температуры по другим интервалам года. По каждому ряду вычислялись значения линейных трендов температуры. По каждой станции полученные 73 значения трендов с последовательными номерами от 1 до 73 описывают годовой ход трендов температуры на станции. В самом общем виде годовой ход трендов температуры на территории России был получен в результате осреднения по всем станциям России. Целью такого осреднения было исключение всех возможных региональных особенностей трендов и выделение только их фундаментальных сезонных различий. Осредненный по всем станциям России годовой ход трендов температуры (T) представлен на рис. 4.6. Стандартное отклонение осредненных значений трендов в каждой пятидневке – около $0,2^{\circ}\text{C}$, а диапазон годового хода осредненных значений трендов в 10 раз больше. Это подтверждает статистическую достоверность сезонных различий трендов температуры воздуха, обобщенных по России.

Совершенно аналогично по тем же станциям были построены по пентадам многолетние ряды количества общей облачности и получен годовой ход трендов количества общей облачности (CL), обобщенный по всей России (рис. 4.6). Стандартное отклонение осредненных значений трендов в каждой пятидневке – около $0,045$ баллов, а диапазон

годового хода осредненных значений трендов облачности в 10 раз больше. Это подтверждает статистическую достоверность сезонных различий трендов количества общей облачности, обобщенных по России.

На рис. 4.6 видно, что количество облачности за последние 30 лет увеличивалось в одних сезонных интервалах и уменьшалось в других (тренды CL положительные и отрицательные). Реакция температурных трендов на изменение количества облачности различна в холодное и теплое полугодия.

В холодную половину года в пятидневках с номерами 57–73 и 1–26 (с октября по апрель) положительные тренды количества общей облачности сопровождаются положительными трендами температуры воздуха, а отрицательные – отрицательными трендами. Объяснение этому факту известно. В холодное полугодие температурный режим атмосферы регулируется преимущественно за счет изменения потока уходящей длинноволновой радиации Земли и нижней атмосферы. Облачность задерживает уходящую радиацию, а увеличение количества облачности за последние 30 лет сопровождается повышением температуры воздуха на некоторых участках в этой части года. Уменьшение количества облачности в других участках холодного периода сопровождается усилением потери тепла атмосферой и понижением температуры. Соотношение последовательных значений трендов температуры и облачности, показанных на рис. 4.6, дает положительные коэффициенты корреляции $r = +0,46$ на интервале пятидневок № 1–26 (январь–апрель) и $r = +0,62$ на интервале пятидневок № 57–73 (октябрь–декабрь). Достоверность положительной корреляции в холодном полугодии – более 95 %.

В теплую половину года на интервале пятидневок № 27–56 (май–сентябрь) – обратное соотношение трендов количества облачности и температуры воздуха. В теплое полугодие температурный режим атмосферы формируется преимущественно приходящей коротковолновой радиацией. Облачность экранирует нижнюю атмосферу от приходящей радиации, температура воздуха понижается. Положительные тренды количества общей облачности на отдельных интервалах теплого

полугодия сопровождаются отрицательными трендами, а отрицательные тренды количества общей облачности на других интервалах теплого полугодия сопровождаются положительными трендами температуры. Соотношение последовательных значений трендов температуры и облачности, показанных на рис. 4.6, на интервале пятидневок № 27–56 (май–сентябрь) дает отрицательный коэффициент корреляции $r = -0,51$. Достоверность отрицательной корреляции в теплом полугодии – более 95 %.

Полученные данные подтверждают известные факты о том, что водяной пар является самым главным парниковым газом и что на некоторых участках холодного полугодия потепление климата может быть частично связано с зафиксированным увеличением количества облачности в последнее тридцатилетие.

Для выявления парникового эффекта других составляющих необходимо избавиться от влияния облачности. Далее продолжим анализ при условиях безоблачной погоды (0 баллов общей облачности за все восемь сроков наблюдений за сутки) и малой относительной влажности воздуха ($<40\%$). Жесткий отбор сухих и безоблачных условий сопровождается трудностями в получении непрерывных 30-летних рядов по пятидневкам. Поэтому дальнейший анализ проводился по месяцам в полной аналогии, как это описано выше для пятидневок. Можно предположить, что тренды температуры в сухой безоблачной атмосфере будут свободны от влияния на них водяного пара. На рис. 4.7 показан годовой ход трендов температуры воздуха, свободного от облачности и повышенной влажности. Там же показан годовой ход радиационного баланса, который получен по результатам наблюдений на станциях России.

Во все месяцы года тренды температуры в сухой безоблачной атмосфере положительные, самые высокие значения трендов в январе–марте и в октябре. Самые низкие значения трендов в июне и декабре.

В сопоставлении с радиационным балансом видно, что при отрицательных и малых значениях радиационного баланса с января по март и в октябре тренды температуры положительные (условия

безоблачной сухой атмосферы). Самые большие тренды температуры, около 1°C за 10 лет, наблюдаются при радиационном балансе от 0 до $0,029 \text{ кВт/м}^2$. При высоких положительных значениях радиационного баланса с апреля по сентябрь – тренды температуры слабые. При значениях радиационного баланса от $0,09$ до $0,18 \text{ кВт/м}^2$ тренды составили от $0,06$ до $0,6^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Исключением из общего правила являются соотношения в ноябре–декабре, которые можно объяснить адвекцией в результате естественных ритмических процессов. Подробнее объяснение особенностей трендов в ноябре–декабре будет дано позднее.

Тренды, величина которых зависит от радиационного баланса, несомненно, имеют радиационное происхождение. Несмотря на малое число случаев (12 месяцев), по данным, представленным на рис. 4.7, можно получить предварительные оценки вклада радиационного баланса в тренды температуры. Анализ по уравнению регрессии показал, что в годовом ходе за январь–декабрь изменение радиационного баланса объясняет 7 % общей изменчивости трендов температуры воздуха сухой безоблачной атмосферы. Далее будет показано, что в ноябре–декабре некоторые естественные циклические процессы создают аномалии, перекрывающие вклад парникового эффекта, поэтому ноябрь–декабрь следует исключить из расчета регрессии. Тогда за январь–октябрь изменение радиационного баланса объясняет 49 % общей изменчивости трендов температуры воздуха сухой безоблачной атмосферы. Учитывая ничтожно малое число случаев, по которым были получены последние расчеты, количественные оценки следует рассматривать только как предварительные.

Выше при анализе годового хода трендов температуры при безоблачных условиях и радиационного баланса указывалось, что исключением из общего правила являются соотношения в ноябре–декабре. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Анализ проводился по всем станциям России на $50\text{--}70^{\circ}\text{с.ш.}$ Для сравнения получены аномалии температуры воздуха по пятидневкам при малооблачных условиях ($0\text{--}3$ балла общей облачности, относительная влажность $q < 35\%$) и аномалии температуры по пятидневкам

без каких-либо условий (условные и безусловные аномалии). В качестве норм взяты средние за 1966–1990 гг., а аномалии вычислены за 1991–2004 гг. Полученные значения показаны на рис. 4.8.

Безусловные отрицательные аномалии в конце года, как уже было показано ранее, хорошо согласуются с уменьшением количества облачности в это время года, но рис. 4.8 показывает, что условные аномалии, которые от изменений облачности не зависят, тоже (в меньшей мере) показывают понижение температуры в это время года (пятидневки № 65–69). Появление отрицательных аномалий становится понятным из анализа погодичных данных, по которым были получены аномалии.

Для выделения сезонных особенностей исключался годовой ход температуры в самом общем виде за весь период. Из погодичных пентадных значений температуры вычитались средние значения за 1966–2004 гг., остатки (аномалии) представлены в виде двумерной диаграммы аномалий (рис. 4.9). По горизонтальной оси отложены годы, а по вертикальной – номера пятидневок года. В году бывает 73 пятидневки, но на рис. 4.9 после № 73 последней пятидневки года повторно показаны пятидневки от начала года, им присвоены номера 74–146. Такой повтор необходим для непрерывного представления переходов от декабря к январю.

С 1968 по 1984 год положительные аномалии наблюдались в конце года (ноябрь–декабрь, пятидневки № 60–73), что при последующем вычислении норм 1966–1990 гг. привело к их завышению в конце года. Начиная с 1989 года положительные аномалии перешли с декабря на январь–февраль (пятидневки № 74–88), а в ноябре (пятидневки № 60–65) стали появляться отрицательные (очень низкие) значения. Арифметически понятно, что низкие значения в ноябре после 1990 года и завышенные нормы в ноябре–декабре за 1966–1990 гг. привели к появлению отрицательных аномалий в ноябре–декабре, как в расчетах без учета облачности, так и при сухих малооблачных условиях. Важно другое, положительные аномалии в холодную часть года, выделенные овалами на рис. 4.9, появляются ритмически примерно

через 10 лет. Ритмичность появления аномалий показывает, что это результат некоторых естественных ритмических процессов, не связанных с парниковыми газами в атмосфере. Поэтому на рис. 4.7 при сопоставлении температурных изменений с радиационным балансом в ноябре–декабре обнаруживалось исключительное несоответствие. Теперь понятно, что в ноябре–декабре более четко проявилась естественная изменчивость, не связанная с парниковым эффектом, которая во всех ранее представленных результатах препятствовала чистому выделению парникового эффекта.

Итак, выделены тренды в температуре воздуха на территории России, не связанные с многолетними изменениями количества облачности и влажности воздуха. В течение года преобладают такие соотношения между значениями радиационного баланса и значениями трендов температуры, которые по определению подтверждают парниковую природу трендов температуры. Отсутствие облачности и влаги в атмосфере в анализируемых случаях позволяет предположить, что в трендах температуры воздуха присутствует парниковый эффект CO_2 или других газовых составляющих атмосферы (не водяной пар). Тренды среднегодовой температуры воздуха при безоблачной погоде больше, чем при погоде облачной.

С увеличением географической широты возрастает эффективность парникового эффекта CO_2 , а значения температурных трендов возрастают с увеличением широты только в интервале от 43 до 58 °с.ш., если не детализировать по месяцам. Севернее 58 °с.ш. эффект CO_2 перекрывается облачными полями и, возможно, адвективными процессами, температурные тренды ослабевают.

Приведенные результаты демонстрируют составляющие изменений климата, связанные с изменением количества облачности, с парниковыми газами и с естественными ритмическими процессами климатической системы.

4.4. Широтный ход радиационного баланса и трендов температуры

Рассмотрим второй природный «эксперимент» – изменение условий радиационного баланса по географической широте.

Географическая широта играет важную роль в формировании радиационного баланса. Для последующего анализа выбирались случаи, когда за сутки за все восемь сроков количество общей облачности не превышало 3 баллов. Ослабление отбора безоблачных суток обусловлено желанием набрать достаточное количество малооблачных суток на различных широтах, так как безоблачные по всем срокам сутки встречаются очень редко в средних и высоких широтах. По выбранным данным за 1976–2005 гг. построены ряды осредненных данных по температуре для зон от 43 до 71 °с.ш. с шагом через 1°. Для сравнения были построены аналогичные осредненные ряды температуры для случаев, когда за сутки за все восемь сроков количество общей облачности превышало 6 баллов. По каждому ряду вычислены коэффициенты линейных трендов температуры, соответствующие заданной географической широте. Значения показаны на рис. 4.10.

По данным о радиационном балансе по станциям России вычислены средние значения радиационного баланса для зон от 43 до 69 °с.ш. через 1° и показаны на том же рис. 4.10.

На рис. 4.10 видно, что с увеличением географической широты радиационный баланс (B) уменьшается. Это должно способствовать лучшему проявлению парникового эффекта и обусловленных им трендов температуры. Но, как видно из сопоставления кривых $T_{\text{я}}$ и $T_{\text{об}}$, изменения трендов температуры зависят не только от географической широты, но и от количества облачности – на всех широтах (на которых имеются данные) в среднем за год тренды температуры сильнее при отсутствии облачности, чем при погоде облачной. Севернее 58 °с.ш. очень редко бывают безоблачные сутки, поэтому не удалось набрать сопоставимое количество данных для построения на рис. 4.10 кривой $T_{\text{я}}$ трендов температуры при безоблачной погоде в высоких широтах. В низких и средних широтах (< 58 °с.ш.) на территории РФ тренды температуры воздуха увеличиваются с ростом географической

широты как при облачной, так и при безоблачной погоде. С увеличением географической широты формируются условия, более благоприятные для проявления парникового эффекта. Это хорошо видно на рис. 4.10 для трендов при ясной погоде. Тенденции противоположных знаков в широтном ходе радиационного баланса и значений температурных трендов, наметившиеся в интервале 43–58 °с.ш., возможно усилились бы в более высоких широтах, но там недостаточно ясных суток для получения таких данных. В высоких широтах, где преобладает сплошная облачность, широтные особенности парникового эффекта CO₂ перекрываются облачностью. При облачных условиях (кривая T_{об}, рис. 4.10) тренды температуры уменьшаются на 59–70 °с.ш.

Полученные результаты показывают, что при отсутствии облачности и увеличении географической широты (с уменьшением радиационного баланса) происходит усиление трендов температуры воздуха. В облачной атмосфере тренды температуры возрастают в интервале 43–58 °с.ш. и затем ослабевают в интервале 59–70 °с.ш.

Анализ данных, представленных на рис. 4.10, об изменении радиационного баланса и трендов температуры в сухой безоблачной атмосфере по уравнению регрессии показал, что изменение радиационного баланса по географическим широтам (в интервале 43–58 °с.ш.) объясняет 25 % общей изменчивости трендов температуры воздуха сухой безоблачной атмосферы. И в этом случае количественные оценки следует рассматривать только как предварительные из-за малого числа анализируемых случаев.

О роли облачности в изменениях климата еще будет сказано в следующем разделе, а здесь приведем многолетние изменения температуры при сухих и безоблачных условиях. Это условия, при которых роль водяного пара в изменениях климата сводится к минимуму.

По всем станциям России в зоне 50–70 °с.ш. выбирались случаи, когда общая облачность была менее 2 баллов, а относительная влажность была менее 40 %. Осреднением данных всех станций по каждому году для холодного (ноябрь–март) и теплого (май–сентябрь) полугодий отдельно были получены значения, представленные на рис. 4.11.

Рис. 4.11 показывает, что при сухой безоблачной атмосфере сохраняются положительные тренды температуры воздуха. В холодный период тренд составляет $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, в теплый период тренд $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Достоверность трендов более 95 %.

Отсутствие облачности и влаги в атмосфере в анализируемых условиях позволяет предположить, что в трендах температуры воздуха присутствует парниковый эффект CO_2 или других газовых составляющих атмосферы (не водяной пар).

Специально подобранные условия численных экспериментов и обнаруженные широтные и сезонные особенности изменений многолетних трендов температуры воздуха свидетельствуют об усилении за последние десятилетия парникового эффекта в атмосфере, не связанного изменениями облачности или влажности воздуха.

4.5. Значение облачности в современных изменениях климата России

Выше было показано значение облачности в формировании температурного режима, теперь необходимо получить количественные оценки. Такие оценки получены на основе построения уравнений регрессии многолетних изменений температуры воздуха от количества облачности. Уравнения регрессии строились по всем метеорологическим станциям России в зоне $50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{с.ш.}$ Анализ проводился по многолетним рядам, построенным по отдельным пентадам года. По каждой метеорологической станции за 1966–2005 гг. были получены годовичные пентадные значения температуры путем осреднения данных по пяти суткам. Пентадам присвоены номера от единицы в начале года до № 73 в конце декабря. За сорок лет по каждой пентаде с заданным номером составлялся ряд среднепентадной температуры воздуха. Таким образом, по каждой станции построено 73 сорокалетних ряда, каждый из которых описывает многолетние изменения в заданном узком (пятидневном) интервале года. На рис. 4.12 показан годовой ход

коэффициента регрессии многолетних изменений температуры воздуха и количества общей облачности в разных широтных зонах. Видно, что летом облачность понижает температуру (экранирует от приходящей солнечной радиации), а зимой – повышает (парниковый эффект облачности). Сравнение трех кривых рис. 4.12 показывает, что в высоких широтах (60–70 °с.ш.) парниковый эффект облачности сильнее, чем в средних (50–60 °с.ш.) и низких (40–50 °с.ш.). Парниковый эффект облачности, так же как и парниковый эффект CO₂, более эффективен в высоких широтах в холодное полугодие, т.е. при условиях, когда радиационный баланс мал или отрицательный. А в теплое полугодие влияние облачности на радиационный режим отличается от влияния парниковых газов.

При большой инсоляции относительно слабый парниковый эффект облачности теплого периода перекрывается отражающей способностью облачности, это приводит не к слабому повышению, а к понижению температуры в нижней атмосфере (в теплое полугодие коэффициенты регрессии отрицательные). Важно определить границы сезонов с разнознаковыми влияниями облачности на температурный режим.

На рис. 4.13 годовой ход коэффициента регрессии температуры и облачности показан при обобщении по всей России. Видно, что переход коэффициента регрессии через нуль весной от положительного знака к отрицательному происходит в пятидневке № 21 (105-й день года, апрель), а переход коэффициента через нуль осенью от отрицательного знака к положительному происходит в пятидневке № 59 (295-й день года, октябрь). Апрель и октябрь являются пограничными месяцами сезонов с различными знаками влияния облачности на температурный режим.

Доля влияния облачности на изменения температуры оценивалась по каждой пентаде как доля (дисперсии) объясненной вариации облачностью относительно общей дисперсии многолетнего ряда температуры в заданном узком (пентадном) интервале года. На рис. 4.14 вклад облачности показан по каждой пятидневке. В сопоставлении с ходом коэффициента b регрессии температуры от облачности видно, что в холодное полугодие отепляющий эффект облачности определяет около 50 % общей изменчивости температуры. В теплое полугодие

охлаждающий эффект облачности определяет около 25 % общей изменчивости. А в апреле и октябре доля объясненной вариации температуры облачностью составляет только около 5 %. Апрель – это месяц, когда тепляющий парниковый эффект облачности заменяется охлаждающим отражательным эффектом, поэтому в апреле вклад облачности в формирование температуры – около нуля. В октябре, наоборот, охлаждающий отражательный эффект облачности заменяется ее тепляющим парниковым эффектом, а вклад облачности в формирование температуры в октябре также – около нуля.

Дополнительно приведем соотношения между изменениями количества облачности и температурой в абсолютных значениях по аномалиям. Оценки получены в результате обобщения по всем станциям России в зоне 50–70 °с.ш. В архиве ВНИИГМИ-МЦД однородные данные об облачности по восьмисрочным наблюдениям имеются с 1966 года, с момента начала в России восьмисрочных наблюдений на всей сети станций. Поэтому анализ выполнен на этом временном интервале. В качестве норм взяты средние за 1966–1990 гг., а аномалии температуры и количества облачности по пятидневкам года вычислены за 1991–2004 гг. Полученные значения показаны на рис. 4.15.

За последние 15 лет большое увеличение количества облачности на 0,5–1,0 балла в январе–феврале (рис. 4.15) сопровождалось повышением температуры воздуха над Россией в эти же месяцы на 3–5 °С. Увеличение количества облачности в октябре и начале ноября и во второй половине декабря на 0,3–0,4 балла сопровождалось повышением температуры на 1–2 °С. А уменьшение количества облачности во второй половине ноября и начале декабря на 0,4 балла сопровождалось понижением температуры воздуха над Россией на 2 °С. Коэффициент корреляции в холодную часть года составил +0,77 (от 59-й пятидневки до 73-й и далее от 1-й до 20-й). В среднем во всех случаях изменение количества облачности на 0,1 балла сопровождалось изменением температуры примерно на 0,4–0,5 °С.

Отдельно на рис. 4.16 показан ход (по пятидневкам) аномалий температуры воздуха и количества общей облачности в теплую часть года (с 21-й по 59-ю пятидневку), когда велика инсоляция и облачность

становится заметным отражающим экраном на пути приходящей солнечной радиации.

В это время года отрицательные аномалии количества облачности сопровождаются повышением температуры, а положительные – понижением. Коэффициент корреляции между аномалиями количества облачности и аномалиями температуры воздуха $-0,64$. При отрицательных аномалиях количества облачности от $-0,21$ до $-0,26$ баллов наблюдаются положительные аномалии температуры от $+1,1$ до $+1,4$ °C. А отрицательная аномалия температуры ($-0,2$ °C) наблюдается только в 52-ю пятидневку (сентябрь) при самой большой положительной аномалии количества облачности ($0,51$ балла).

В аномалиях температуры всегда присутствует некоторый сдвиг в положительную сторону, не связанный с облачностью. Возможно, это проявление составляющей парникового эффекта CO_2 . При отрицательной корреляции между облачностью и температурой в этом полугодии, несмотря на то, что в среднем за теплый период аномалия количества облачности положительная, температура в среднем за этот сезон увеличилась.

Таким образом, количественные оценки показывают, что облачность с ее парниковым и отражательным эффектом является одной из главных, но не единственной причиной изменений климата последних десятилетий в России, и согласуется с результатами, описанными ранее об усилении парникового эффекта в потеплении климата, не связанного с водяным паром. Предположительно это усиление трендов связано с увеличением концентрации CO_2 в атмосфере.

Вклад CO_2 в современные изменения климата оценивается ориентировочно по одним оценкам в интервале от 7 до 49 %, а по другим составляет около 25 %. Последняя оценка не противоречит первой и может быть принята в качестве основной.

Итак, анализ эмпирических данных показывает, что усиление трендов температуры за период второго глобального потепления ориентировочно на 25 % вызвано повышением концентрации углекислого газа в атмосфере. Усиление парникового эффекта не является основной причиной современного глобального потепления.

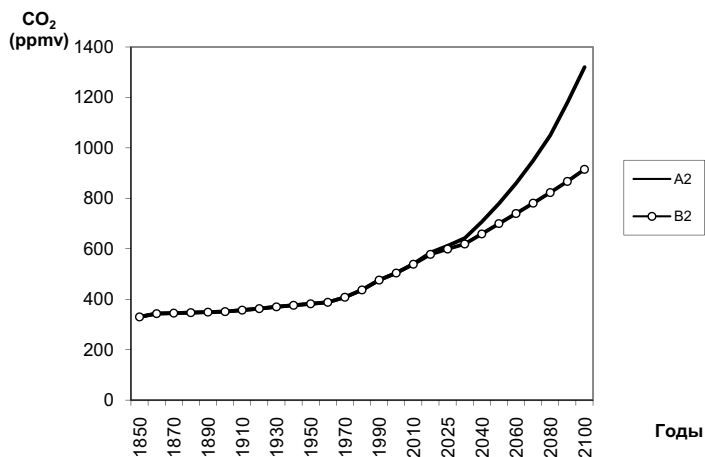


Рис. 4.1. Рост концентрации парниковых газов по сценариям A2 и B2

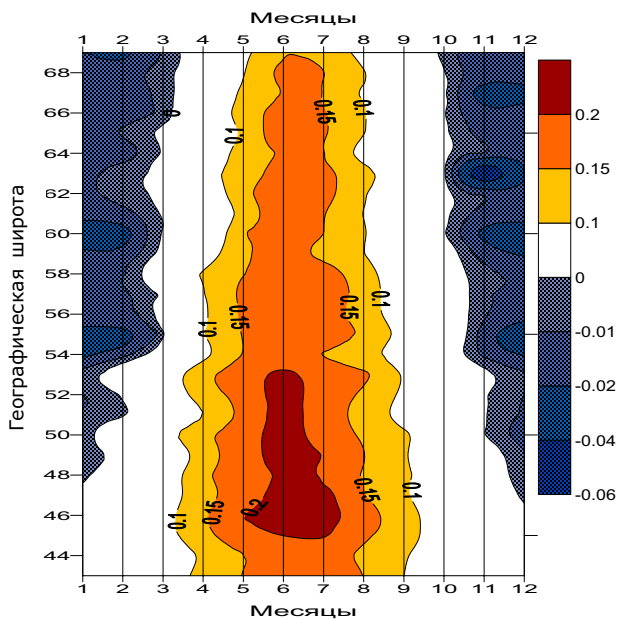


Рис. 4.2. Зонально-осредненные значения радиационного баланса (кВт/м²) земля–атмосфера на станциях России (1996–2004 гг.)

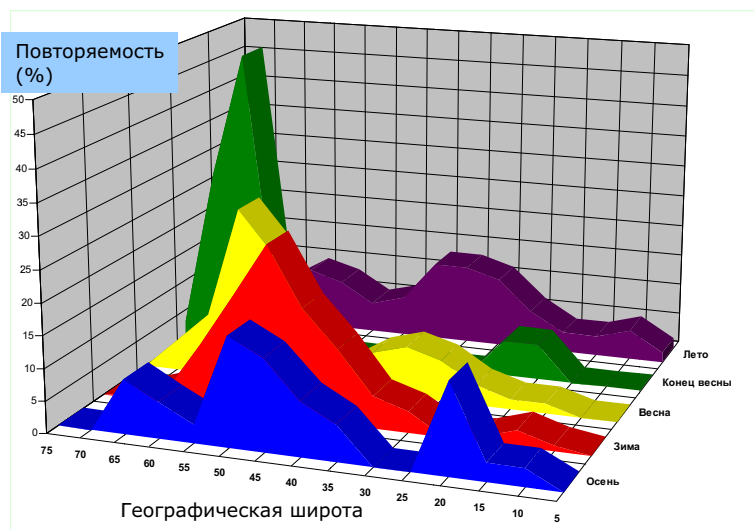


Рис. 4.3. Повторяемость (%) положительных трендов температуры по сезонам года на различных широтах Северного полушария

Широта	Зима	Зима–весна	Конец весны	Лето	Осень
75	0	0	2,9	1,6	0
70	0,8	4,8	28,6	7,9	0
65	2,5	9,7	48,6	6,3	8,6
60	10,0	27,4	5,7	9,5	5,7
55	18,3	21,0	2,9	7,9	2,9
50	26,7	6,5	0	4,8	17,1
45	17,5	3,2	0	6,3	14,3
40	11,7	6,5	0	12,7	8,6
35	5,0	8,1	0	12,7	5,7
30	3,3	6,5	0	11,1	0
25	0	3,2	5,7	6,3	17,1
20	0,8	1,6	5,7	3,2	14,3
15	2,5	1,6	0	4,8	2,9

Рис. 4.4. Сезонно-широтная динамика повторяемости (%) положительных трендов температуры в Северном полушарии

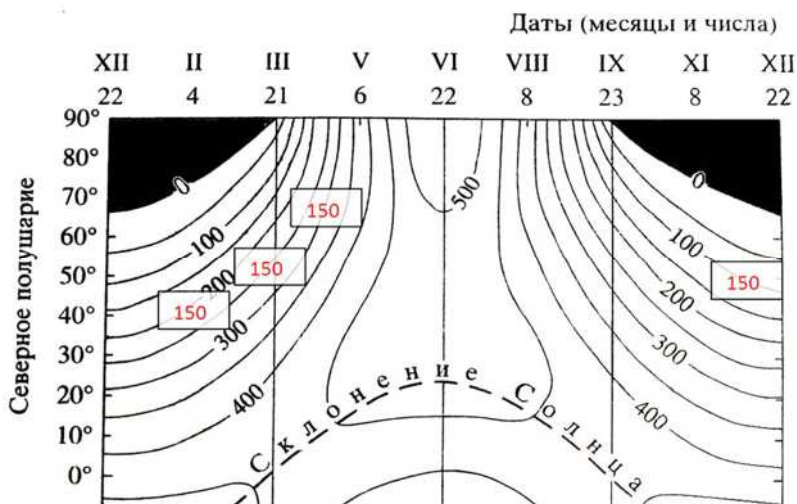


Рис. 4.5. Прямая солнечная радиация на верхней границе атмосферы (Вт/м^2) и широты с положительными трендами: 45–55 °с.ш. (зима), 55–60 °с.ш. (зима–весна), 65–70 °с.ш. (конец весны), 45–50 °с.ш. (осень)

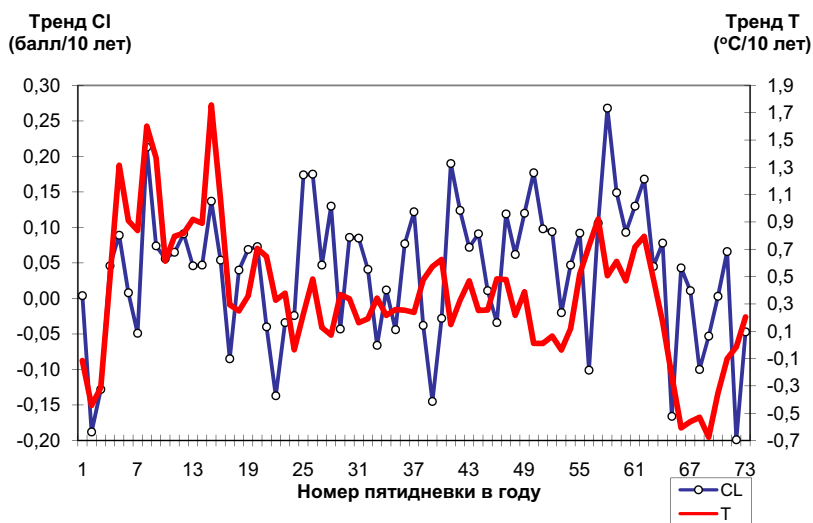


Рис. 4.6. Тренды температуры воздуха (T) и количества общей облачности (CL) по пятидневкам года

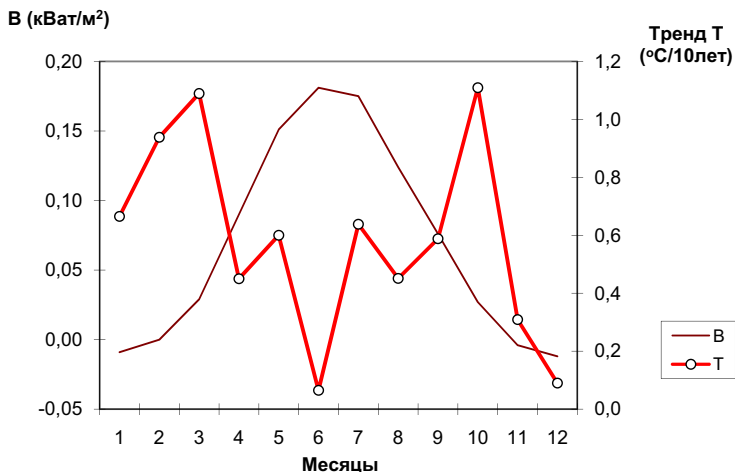


Рис. 4.7. Тренды температуры (Т) сухого воздуха при отсутствии облачности и радиационный баланс (В)

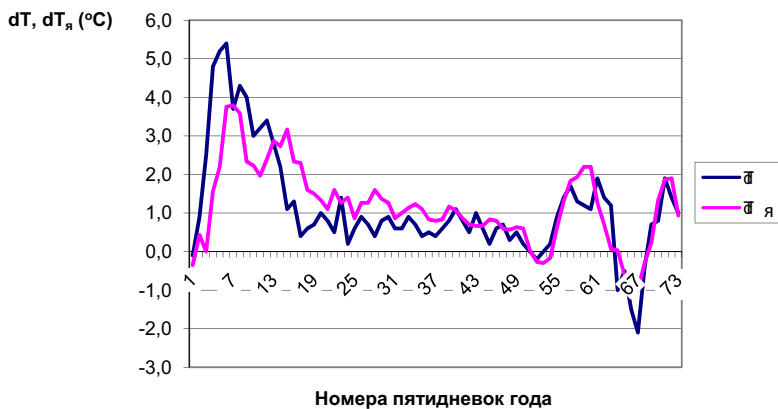


Рис. 4.8. Годовой ход (по пятидневкам) аномалий температуры воздуха в 1991–2004 гг. относительно средних за 1966–1990 гг. при сухой безоблачной погоде ($dT_{я}$) и без условий (dT)

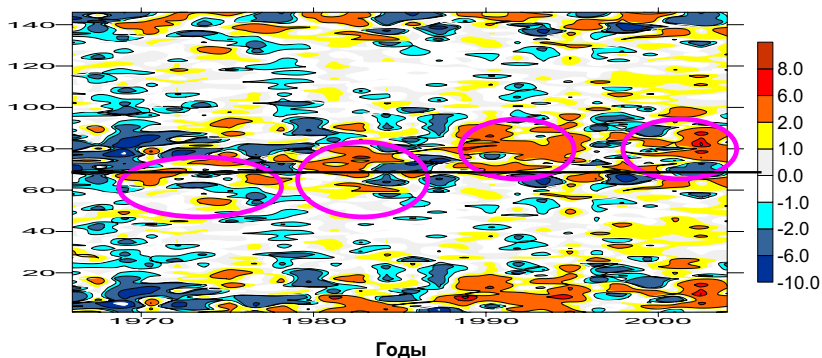


Рис. 4.9. Аномалии температуры ($^{\circ}\text{C}$) на территории России по пятидневкам года и по годам. Горизонтальная ось – годы, вертикальная ось – номера пятидневок года с начала января (№ 1) по конец декабря (№ 73) и далее повтор за январь–декабрь

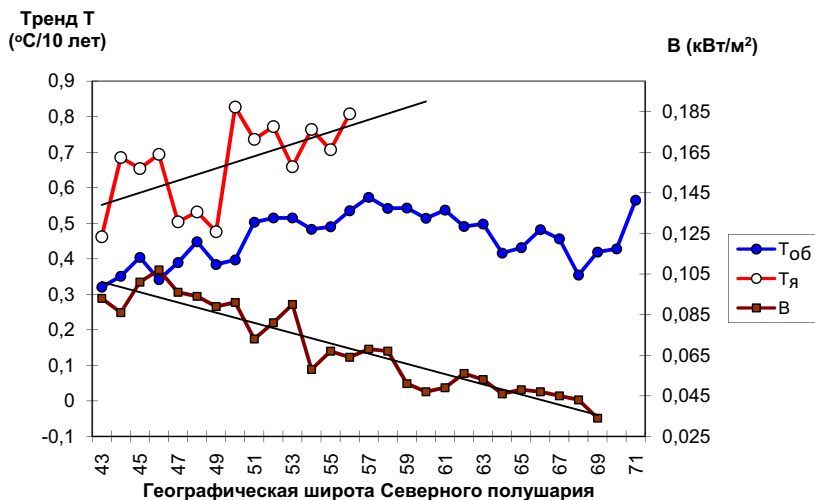


Рис. 4.10. Зонально-осредненный радиационный баланс (B) и тренды температуры воздуха при сухой безоблачной ($T_{\text{я}}$) и облачной ($T_{\text{об}}$) погоде по широтам

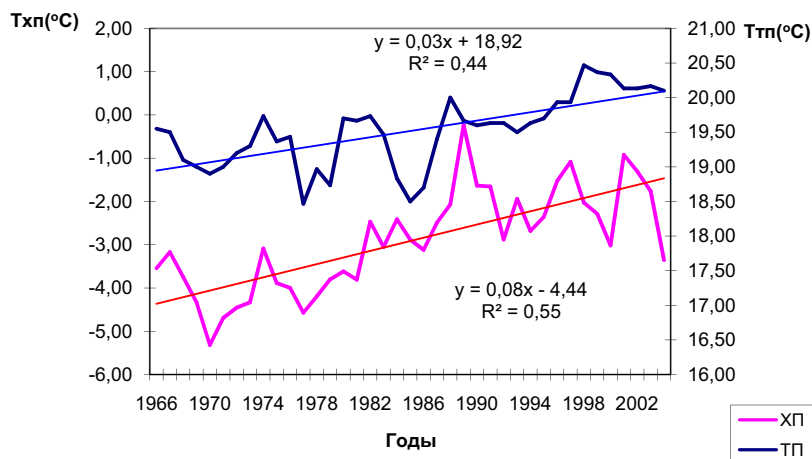


Рис. 4.11. Многолетний ход температуры при сухой безоблачной погоде в холодный (ХП, ноябрь–март) и теплый период (ТП, май–сентябрь) по станциям России в зоне 50–70 °с.ш. Скользящие средние по трем годам

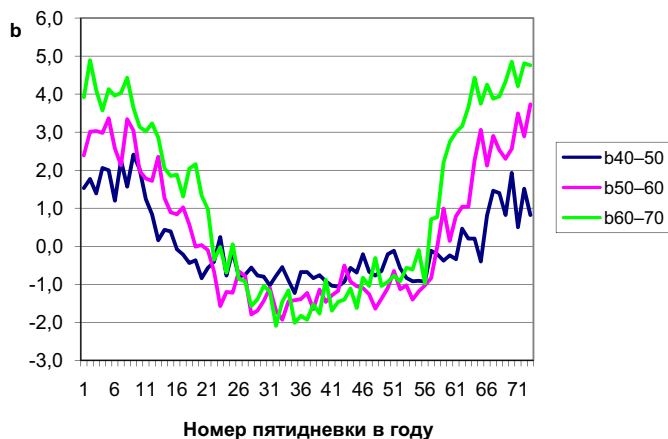


Рис. 4.12. Годовой ход по пятидневкам коэффициента регрессии многолетних изменений температуры воздуха и количества общей облачности. Станции РФ по зонам 40–50°, 50–60°, 60–70 °с.ш.



Рис. 4.13. Годовой ход по пятидневкам коэффициента регрессии b многолетних изменений температуры воздуха от количества общей облачности по станциям РФ. Сглажено по трем точкам.

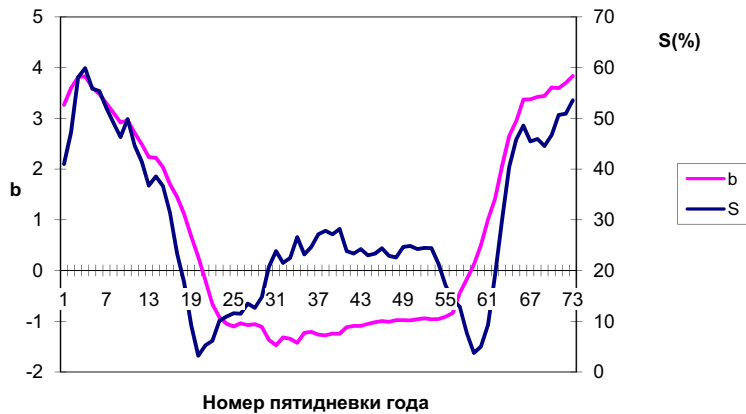


Рис. 4.14. Годовой ход по пятидневкам доли объясненной вариации (S) температуры облачностью и коэффициента регрессии (b) температуры от количества общей облачности. Сглажено по пяти точкам.

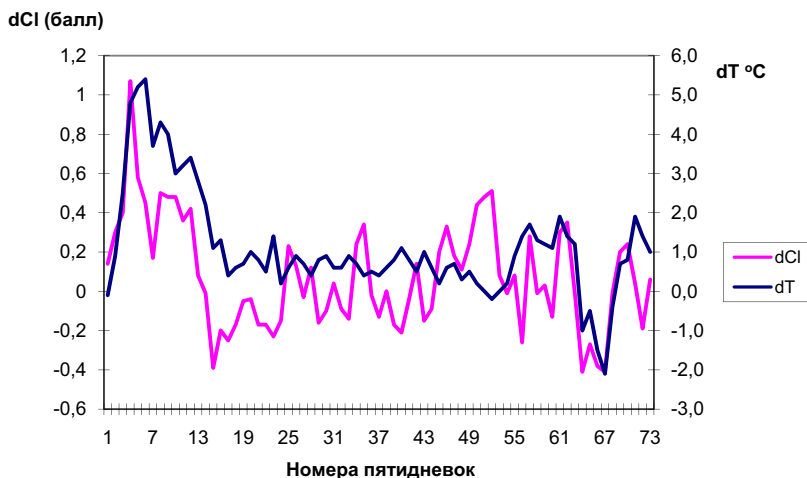


Рис. 4.15. Годовой ход (по пятидневкам) аномалий температуры воздуха (dT) и количества общей облачности (dCl) в 1991–2004 гг. относительно средних за 1966–1990 гг.

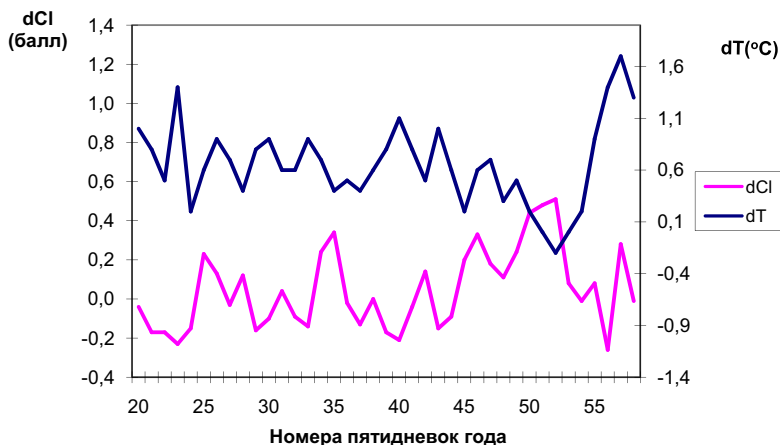


Рис. 4.16. Изменение в теплую часть года (по пятидневкам) аномалий температуры воздуха и количества общей облачности в 1991–2004 гг. относительно средних за 1966–1990 гг. Станции России в зоне 50–70 °с.ш.

Глава 5. Физико-математические модели климата

Несмотря на прогресс, достигнутый в понимании естественных колебаний климата (глава 3), остается много проблем в области физико-математического моделирования климата.

5.1. Предсказуемость климата

При построении физико-математических моделей атмосфера рассматривается как хаотическая система с ограниченной предсказуемостью. Ограниченность обычно рассматривается как следствие первоначальной неопределенности ее состояния. Неопределенность состояния атмосферы вызвана недостаточной густотой глобальной сети станций наблюдений, недостаточной точностью наблюдений и недостаточностью параметров наблюдений за атмосферой. Так как в модели участвуют еще и другие составляющие климатической системы, то правильнее говорить о том, что прогностическая ограниченность физико-математических моделей связана с недостаточностью сведений о первоначальном состоянии всех составляющих климатической системы. Ярким примером недостатка знаний является Мировой океан со всей его толщей, измерения в котором проводятся эпизодически, а на огромных просторах вообще никогда не проводились.

При прогностических вычислениях усиление неопределенности состояния климатической системы со временем увеличивается из-за накапливающихся ошибок. Пределом прогноза становится момент, когда вся информация о первоначальном состоянии системы оказывается утраченной.

Следует добавить, что вышесказанное является лишь частью проблемы прогноза климата на основе моделей. Другой и, видимо, главной проблемой является недостаточность наших знаний о всех

физических процессах в климатической системе и о влияющих на нее внешних факторов, а также – несовершенство самих моделей.

В прогнозах климата получили признание ансамблевые прогнозы по большому количеству разных моделей. Считается, что ошибки разных моделей не коррелированы между собой, случайны и поэтому в результате ансамблевого осреднения взаимно уничтожаются. При этом получается лучшее согласие модельных оценок на прошлые годы и наблюдаемых в те же годы изменений глобального климата.

Несовершенство каждой отдельной модели приводит в каждом случае к своим ложным «естественным» колебаниям климата, которые понижают оценки качества каждой модели. Сглаживание ложных колебаний при ансамблевом моделировании действительно повышает точность описания трендовой составляющей глобального потепления на основе одного фактора – антропогенного повышения концентрации CO_2 в атмосфере. Взаимное уничтожение случайных (естественных) колебаний в ансамбле моделей только доказывает, что модели не воспроизводят естественных колебаний климата, они воспроизводят шум с частотами и амплитудами, похожими на естественные колебания. К такому выводу приводят исследования предела предсказуемости по отдельным моделям. Так, например, в работе [103] проведен анализ изменений климата океана в регионе Северной Атлантики в масштабах многих десятилетий с использованием полной модели климата (для системы «атмосфера–океан»), разработанной в Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) для численного моделирования природно-обусловленных изменений и антропогенного потепления. Специальной настройкой модели удалось получить на выходе характерные флуктуации циркуляции океана в Северной Атлантике и в высоких широтах в масштабах времени порядка 40–60 лет. Такие колебания действительно существуют и играют важную роль в колебаниях климата высоких широт (разд. 1.2). Эксперименты с моделью привели к выводу, что описание колебаний климата Северной Атлантики по модели удастся главным образом за счет учета следующих трех физических механизмов: 1) глубинной конвекции в субполярных широтах, которая играет роль «интегратора» флуктуаций атмосферы, реагируя в

форме «красного шума» на атмосферные возмущения; 2) термохалинной циркуляции, которая может порождать осцилляции в океане в многодесятилетних масштабах времени; 3) нелокальных воздействий, возникающих за счет периодических аномалий переноса пресных вод посредством адвекции из полярных регионов на юг Восточно-Гренландским течением. Однако предсказуемость колебаний климата по модели очень ограничена, авторы признают, что потеря предсказуемости возникает из-за неадекватного учета физических механизмов, ответственных за естественные колебания климата. Как и в других случаях, модель воспроизводит колебания, похожие на естественные колебания климата в прошлом, но не вполне пригодна для прогноза колебаний на будущее. Положительным результатом упомянутых исследований является выявление возможных ближайших факторов долгопериодных колебаний климата, хотя описать их физические механизмы не удалось с достаточной точностью. А причины возникновения и поддержания исходных колебаний для трех перечисленных механизмов совсем не рассматриваются.

Значительно чаще в исследованиях используют модели, которые не описывают собственные свойства системы, а дают оценки только антропогенной составляющей. Эта оценка сильно зависит от заданной в модели чувствительности к концентрации CO_2 в атмосфере. Но необходимо помнить, что чувствительность климатической системы к CO_2 подобрана в модели экспериментально в предположении о том, что все остальное в модели правильно. Но если модель не описывает собственные колебания системы, как она может описать внешнее воздействие на эту систему?

Какова причина возникновения и что поддерживает собственные колебания климатической системы? В работе [66] утверждается, что собственная «изменчивость» (правильнее говорить о собственных колебаниях) климатической системы обусловлена нелинейными взаимодействиями между ее компонентами (атмосфера, гидросфера, криосфера, деятельный слой суши и биосфера), имеющими разные времена релаксации к внешним воздействиям.

Согласно этой работе, время, в течение которого тропосфера может вернуться в квазиравновесное состояние, составляет от нескольких дней до нескольких недель, а стратосфере для этого требуется

несколько месяцев. Вследствие огромной теплоемкости океана время его реакции на внешние воздействия может составлять от нескольких (верхний перемешанный слой) до тысяч лет (глобальная термохалинная циркуляция). Реакция на внешние воздействия основной части криосферы, представленной ледяными щитами Гренландии и Антарктиды, также может измеряться сотнями и тысячами лет.

Характерные времена возврата перечисленных отдельных элементов колебательной системы справедливы и для необходимого времени внешнего воздействия на них, чтобы сначала вывести их из равновесия. Какие внешние воздействия длительностью или периодичностью от нескольких до тысячи лет и более привели к сегодняшнему состоянию климатической системы и к каким состояниям они приведут в будущем? Совершенно очевидно, антропогенными эти факторы не являются, но они существуют. А если существуют внешние многолетние воздействия, тогда климатическую систему нельзя считать замкнутой системой с единственным внешним воздействием – антропогенным. О том, что естественные колебания климата были всегда, известно достоверно, а то, что современные изменения климата являются преимущественно антропогенными – требует дополнительных доказательств. Частичное влияние усиления концентрации парниковых газов на потепление климата подтверждается (глава 4), но парниковый эффект никак нельзя признать основным фактором.

Далее будут рассмотрены сведения, которые в публикациях приводятся в качестве доказательств антропогенной парниковой природы современного глобального потепления.

5.2. Физико-математические модели климата, построение и принципы согласования с данными наблюдений

В работе [8] утверждается, что вся история изменений климата – это история выбросов CO_2 вулканами. Эта гипотеза об исключительной роли парниковой природы колебаний климата легла в основу

понимания причин современного глобального потепления климата на основе антропогенного роста концентрации CO_2 в атмосфере. К сожалению, все другие известные факторы изменений климата выпали из рассмотрения.

Первые предположения о связи потепления климата с ростом антропогенных выбросов возникли на основе обнаруженного подобия тренда глобальной температуры и роста концентрации CO_2 в XX столетии. Для проверки этой гипотезы необходимо было решить, может ли зафиксированное повышение концентрации CO_2 привести к такому потеплению климата, которое наблюдалось с середины XX века. Ставилась цель определения вклада CO_2 в потепление климата независимо от других факторов.

По аналогии с англоязычной литературой величину вклада CO_2 иногда называют форсингом CO_2 . Но температура является одним из показателей состояния климатической системы с ее сложными внутренними связями прямыми и обратными, положительными и отрицательными. Так возникла задача построения модели климата (ранее чаще называли модель общей циркуляции атмосферы) для оценки форсинга CO_2 .

Сложнейшая задача решалась во многих климатических центрах мира. К настоящему времени построено несколько десятков полных физико-математических моделей климата, в которых с той или иной точностью учтены все составляющие замкнутой климатической системы с одним внешним фактором – увеличение концентрации CO_2 .

Дальнейшая настройка модели заключается в подборе чувствительности модели к изменению концентрации CO_2 по экспериментальным данным. Коэффициенты, определяющие чувствительность, задаются так, чтобы добиться наилучшего согласия модельных и экспериментальных данных об изменении глобальной температуры. Изначальная гипотеза о роли CO_2 незаметно превращается в аксиому, осталось подобрать параметры, при которых это возможно в предположении об отсутствии других внешних факторов (солнечная активность, неравномерность вращения и движения Земли, дегазация Земли и т.д.). Но именно роль других факторов остается неизвестной в такой

же степени, как и роль антропогенного CO_2 . Постановку эксперимента по подборке чувствительности модели к концентрации CO_2 в этом случае следует признать некорректной. Эффективность CO_2 в изменении климата является лишь одной из гипотез. Первоначальное стремление получить количественные оценки форсинга CO_2 заменены стремлением экспериментально его подобрать, игнорируя многие другие научные факты.

Современные модели климата – это модели, в основе которых лежит современная модель общей циркуляции атмосферы и океана, причем центральным направлением их развития является все более точное описание всех физических процессов, участвующих в формировании климата. Первой проблемой на этом пути является недостаточность наших знаний о всех участвующих физических процессах. Но задача столь велика и трудоемка, что на первых же порах начинаются упрощения в части тех факторов и процессов, которые пока не поддаются математическому описанию. Полные физико-математические модели климата строятся на основе известных законов физики в форме математического их описания применительно к климатической системе со множеством эмпирических коэффициентов, значения которых подбираются в ходе построения самой модели. В мире существуют десятки моделей климата, в которых климатическая система описывается очень по-разному. Невозможно предположить, что найдется модель, в которой идеально математически описаны все процессы климатической системы, хотя бы потому, что они не все известны даже на качественном уровне.

Теплоемкость верхнего слоя перемешивания океана, с которым взаимодействует атмосфера, во много раз превышает теплоемкость всей атмосферы, поэтому малейшие изменения в океане способны произвести существенные изменения в атмосфере. Но о циркуляции океана во всей толще с необходимой точностью мало что известно. Даже если бы удалось идеально математически сформулировать все процессы в климатической системе, неопределенность эмпирических коэффициентов не позволит получить идеальный результат.

Несколько лет назад на сайте Климатического центра им. Хедли в Великобритании (Hadley Centre) была опубликована брошюра с описанием принципов построения полной модели климата HadCM3 и основных нерешенных проблем. Эти принципы и проблемы заложены во всех существующих моделях и заслуживают обсуждения. В брошюре четко указано, что полная модель атмосфера–океан разрабатывалась для имитации изменений климата при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере. Первоначально все модели создавались для получения оценок влияния усиливающейся концентрации CO_2 в атмосфере на глобальное потепление.

Индустриализация общества сопровождается не только выбросами CO_2 , но и выбросами аэрозолей, которые уменьшают приходящее к поверхности земли солнечное тепло и ведут к понижению температуры воздуха. Метеорологические станции фиксируют результат такого двойного антропогенного воздействия с разными знаками. Чувствительность климатической системы не известна ни на увеличение CO_2 , ни на увеличение аэрозолей в атмосфере. Опуская все другие проблемы моделей, вначале рассмотрим только эту проблему. Коэффициенты чувствительности моделей на CO_2 и аэрозоли выбираются экспериментально так, чтобы модель давала реалистичные изменения глобального климата. Единственного решения в выборе коэффициентов не существует, а реалистичность модели может быть достигнута, даже если оба коэффициента ошибочны, но их ошибки компенсируют друг друга в современных условиях. Если в будущем соотношение концентраций CO_2 и аэрозолей изменится, то ошибки проявятся. Неоднозначность выбора коэффициентов приводит к неоднозначным оценкам будущего климата по моделям. По высказываниям одного из ведущих авторов лучшей современной российской модели климата Е.М. Володина, подбор параметров модели – это не наука, а, скорее, искусство. Другой крупный специалист в области моделирования С.С. Зилитинкевич в одном из своих докладов на семинаре в РАН в 2010 году говорил о том, что в моделях много параметров подбирают экспериментально, каждый коэффициент может быть не совсем правильным (иногда коэффициент в несколько раз может превосходить допустимые его значения, которые известны из экспериментов), но

все вместе коэффициенты согласованы на получение правильного конечного результата – согласие результатов моделирования с данными наблюдений. Даже если все коэффициенты не совсем правильные, модель может описать то, на что она оптимизирована при настройке. По мнению С.С. Зилитинкевича, если вдруг откуда-то появится один правильный коэффициент и его вставить в модель, то результат модели ухудшится, потому что возникнет рассогласование со всеми остальными неправильными формулами и коэффициентами.

На основании сказанного следует признать, что случайное совпадение модельных и реальных данных за счет удачного случайного подбора коэффициентов в модели не может быть доказательством пригодности такой модели для прогноза климата. На основании такой модели нельзя ответить на вопрос о вкладе антропогенного CO_2 в современное глобальное потепление и уж совсем нет никаких оснований для использования такой модели для прогноза изменений климата на далекую перспективу.

Огромная теплоемкость океанов и крупномасштабное географическое перераспределение теплоты океанской циркуляцией делают океаны решающим компонентом в системе климата. Без океана модель атмосферы дает быстрое нереальное увеличение температуры под влиянием парникового эффекта. Присоединение океана в модели замедляет изменения температуры, но и создает новые проблемы. Различия в теплоемкости океана и атмосферы требуют пока недостижимой точности модели океана. Из-за недостатков в описании взаимодействия океана и атмосферы температура атмосферы уходит далеко от реальных значений. Поэтому в модель введены эмпирические корректировки потоков тепла из атмосферы в океан и обратно (по материалам брошюры климатического центра Великобритании).

Большой проблемой в модели является величина парникового эффекта водяного пара, а неизученная роль облаков дает начало самой большой неопределенности в предсказаниях климата. Моделирование радиационных потоков в радиационном блоке настраивается с использованием данных реанализа. Так эмпирически достигается непротиворечивое описание радиационного баланса для исследований парникового эффекта и для проверки правильности модели климата.

Построенные таким образом модели с относительной точностью воспроизводят годовой ход некоторых метеорологических показателей и создают шум межгодовых колебаний климата с амплитудой, близкой к реальным короткопериодным колебаниям, но совсем не дают трендов, если отключен блок усиления парникового эффекта. На рис. 5.1 показаны результаты работы ансамбля из 16 моделей при двух условиях: 1) модель с учетом известного роста концентрации CO_2 ; 2) модель с концентрацией CO_2 доиндустриального уровня.

Из рисунка видно, что без учета роста CO_2 модель показывает полное отсутствие изменений климата, а введение роста CO_2 в модель приводит к появлению тренда в модельных данных в полном согласии с реальным глобальным потеплением. Из этого делается вывод о том, что результаты, представленные на рис. 5.1, доказывают парниковую антропогенную гипотезу о природе современного потепления.

Следует заметить, что эти же результаты можно рассматривать как доказательство того, что модель содержит лишь один внешний фактор возмущений климатической системы и что удалось экспериментально подобрать параметры чувствительности модели к этому фактору так, чтобы добиться согласия модельных и фактических данных об изменении глобальной температуры. Это не доказывает гипотезы, так как в численных экспериментах не участвовали другие факторы. Вопрос о количественной оценке антропогенного вклада в современные изменения климата остается открытым.

Научная дискуссия продолжается. В работе [83] отмечено, что модели, на которых «доказана» решающая роль антропогенных факторов в современном потеплении климата, не позволяют адекватно отразить основные закономерности изменений площади арктических льдов, их толщины, уровня моря, распространения многолетних льдов, географические особенности климатических изменений. Модели не позволяют описать особенности изменений климата именно в высоких широтах, где теоретически должны быть самые яркие проявления изменения радиационного баланса из-за антропогенного CO_2 . Список публикаций известных российских и зарубежных ученых, в которых отвергается представление о решающей роли антропогенных парниковых газов, постоянно расширяется [37, 59, 97].

Убедительные эмпирические доказательства значимого вклада естественных колебаний климата в современное глобальное потепление помогают совершенствовать физико-математические модели. В новых моделях уже проводится первая попытка предсказания изменений климата на ближайшие 10–30 лет с учетом еще и естественных колебаний. Утверждается [66], что такие естественные колебания на временных масштабах 10–30 лет могут быть сравнимы, а в некоторых местах могут даже превосходить вклад от парникового эффекта. Например, именно сочетанием глобального потепления и естественных колебаний объясняется особенно быстрое уменьшение площади летнего льда в Арктике в последние годы, а также зимнее потепление конца 80-х и 90-х годов на Европейской части России.

Физико-математические модели климата своим главным предназначением имеют получение оценок будущих состояний климата. Настройка моделей определяется в режиме диагноза или ретроспективного прогноза условий климата в прошлое. Настройка включает задание чувствительности (форсинга) на те или иные факторы и некоторые коэффициенты, которые определяют величину и запаздывание прямых и обратных связей, положительных и отрицательных.

По результатам численных экспериментов по 21 модели, участвующей в проекте СМIP3, получены оценки средней глобальной поверхностной температуры воздуха за 1900–1999 годы. Во всех модельных расчетах изменение концентрации CO_2 в XX веке использовалось из наблюдений. Тем не менее различия в оценках температуры составляют до 3 градусов. В работе [12] отмечается, что результаты многомодельных ансамблевых прогнозов, полученных на основе прогнозов, полученных по каждой модели отдельно, указывают на большие значения стандартных отклонений относительно ансамблевого среднего. В таких ситуациях среднее (ансамблевое) значение случайной (модельной) величины по рассматриваемой выборке (ансамблю) не является хорошей характеристикой индивидуальных значений и не может рассматриваться как эффективная прогностическая оценка этой величины. Показано, что ансамблевые средние значения средних глобальных температур оказались сильно смещенными. Так как не все

модели ансамбля одинаково хороши, эффективнее в ансамбле использовать оптимальные весовые коэффициенты для воспроизведения климатических изменений прошлого, но такой статистический подход делает прогностические оценки слишком чувствительными к «шуму», содержащемуся как в фактических, так и в модельных значениях. Это препятствует, как указано в [12], использованию этих оценок для характеристики изменений климата в будущем. Под шумом фактических значений авторы [12], видимо, понимают неадекватность некоторых рядов исходных данных: проблемы глобального осреднения и естественные колебания климата, не учтенные в моделях. Следует отметить, что попытки улучшения модельных прогнозов без улучшения самих моделей не дает желаемых результатов. Ансамбль даже самых лучших моделей из имеющихся плохих моделей не может с достаточной точностью описать прошлый климат даже на том интервале, на котором проводилась настройка модели при известных концентрациях парниковых газов и других параметров. Если учесть, что на будущее некоторые входные параметры модели тоже являются результатами неуверенных прогнозов, то доверие к существующим модельным прогнозам климата становится еще меньше.

Второй важный вывод [48] заключается в том, что более высокая точность модельных значений получается при сравнении не погодичных среднеглобальных модельных и реальных температур, а отфильтрованных путем 10-летнего скользящего осреднения температур. Последнее означает, что модели описывают только трендовую составляющую, которая управляется в моделях концентрацией CO_2 , и не воспроизводят естественных колебаний климата.

В работе [48] справедливо отмечается, что главная проблема климатических моделей в том, что они обучаются на предыдущем ряде наблюдений, а поэтому их конечный результат – повторение предшествующего хода изменений температуры. Модели, безусловно, полезны, но они не являются инструментом прогноза в связи с очень высокой степенью неопределенности.

5.3. Оценки точности моделей

Для оценки достоверности работы модели и сценариев будущего климата применяют сравнение модельных расчетов с результатами инструментальных наблюдений прошлого и текущего климата. Предполагается, что если модель правильно описывает климатические особенности прошлого, то и в будущем, при новых входных условиях, климат будет описан правильно. Строго говоря, улучшение согласованности модели с наблюдениями может быть случайным, так как ни чувствительность климата к парниковым газам, ни ослабляющий эффект аэрозолей, озона, вулканической пыли не известны. Согласие может достигаться, если ошибки в чувствительности к парниковым газам компенсируются в модели ошибками в ослаблении аэрозольными частицами. Поэтому в дополнение к сопоставлению глобальных изменений температуры исследуют точность описания моделью географических и вертикальных особенностей изменения климатических характеристик.

Реалистичность описания региональных физико-географических и климатических условий зависит от сложности этих условий и пространственной детализации модели. В [88] проведена оценка точности трех климатических моделей (CGCM2, HadCM3 и ECHAM4/OPYC3) для описания используемых метеорологических характеристик в узлах географической сетки.

Далее приведены основные результаты по исследованию ошибок моделей CGCM2, HadCM3 и ECHAM4/OPYC3 из [88]. Все рассмотренные модели полные, т.е. атмосферная модель работает совместно с океанической. Во всех моделях для оценок предстоящих изменений климата при оценках точности использовался наиболее жесткий из возможных вариантов накопления CO₂ сценарий A2, заметим, что на интервале до 2050 года он мало отличается от других сценариев.

Для сопоставления модельных значений с фактическими использовались среднемесячные значения температуры воздуха по 8000 станций Северного полушария Земли. Распределение метеорологических станций на Земле очень неравномерно по странам и континентам.

Особой густотой отличаются США, на территории этой одной страны работает примерно четверть всех станций. По территории России использовались данные всех работающих станций в количестве около 1600 штук с рядами разной длительности. Чтобы немного уменьшить преобладание станций в небольших регионах, исходные данные со станций интерполировались в узлы географической сетки $2 \times 2^\circ$. Данные всех станций в каждом таком квадрате осреднялись с весами, обратно пропорциональными расстоянию до узла. Из всех узлов для работы взяты те, в которых есть данные о температуре воздуха за 1990–2005 гг. Покрытие Северного полушария данными оказалось хорошее, за исключением высоких широт, где мало метеорологических станций.

Данные о температуре воздуха по моделям CGCM2, ECHAM4, HadCM3 в исходном виде содержатся в узлах географической сетки, для каждой модели – своя сетка. Для сравнимости все модельные данные были пересчитаны в узлы сетки $2 \times 2^\circ$. Для каждого узла отдельно для каждого месяца года вычислено модельное значение температуры путем интерполяции по окружающим четырем точкам. Так получены модельные данные CGCM2, ECHAM4, HadCM3 в единой системе географических координат.

Модели не дают прогноз изменения климата, они лишь описывают ансамбль возможных состояний климатической системы при воздействии на нее антропогенных факторов по заданному сценарию, который тоже является результатом прогноза. Вычисленные по моделям значения метеорологических величин можно использовать только в обобщенном виде, например в виде осредненных по времени или по пространству величин.

Каждая модель имеет свои особенности и неточности в описании регионального климата. Получить оценки точности моделей для географической точки можно путем сравнения реальных и модельных значений в этой точке.

По узлам $2 \times 2^\circ$ вычислены средние за 16 лет месячные значения температуры (за 1990–2005 гг.), за те же годы вычислены средние месячные температуры по данным моделей и получены разности (из

модельных значений вычтены значения, полученные из наблюдений на станциях, пересчитанные в узлы).

В табл. 5.1 и 5.2 показаны ошибки моделей, обобщенные по всем узлам Северного полушария. Ошибки вычислены при использовании каждой модели отдельно: CGCM2, ECHAM4, HadCM3 и осредненной модели SUM. В таблице приведены оценки по упомянутой модели SUM по узлам сетки Северного полушария.

Т а б л и ц а 5.1

Среднеквадратические ошибки температуры по узлам сетки
Северного полушария

Модель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
CGCM2	5,7	5,4	4,9	4,6	4,2	3,4	3,1	3,1	3,1	3,7	4,8	5,5	
ECHAM4	3,8	3,7	3,6	3,6	3,3	3,2	3,3	3,0	2,8	2,9	3,2	3,6	
HadCM3	4,0	3,8	3,5	3,2	3,0	2,9	3,1	3,2	2,9	3,0	3,4	3,7	
SUM	3,5	3,3	3,1	3,1	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,9	3,2	2,44

Т а б л и ц а 5.2

Средние ошибки температуры по узлам сетки Северного полушария

Модель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
CGCM2	-1,6	-3,2	-3,4	-4,4	-3,7	-2,5	-1,1	0,0	0,4	0,3	1,1	0,8	
ECHAM4	1,5	0,8	0,5	0,4	0,1	0,8	1,5	1,8	1,6	1,1	1,3	1,5	
HadCM3	-3,0	-3,8	-2,8	-1,9	-1,0	-0,9	-0,7	-0,5	-1,0	-1,7	-1,9	-2,6	
SUM	-1,0	-2,0	-1,8	-1,9	-1,5	-0,8	-0,1	0,4	0,3	-0,1	0,2	-0,1	-0,05

Средние ошибки показывают, что модель CGCM2 в среднем по Земле в 1990–2005 гг. занижала температуру с января по июль, а с ноября по декабрь – завышала. Ошибки в разные месяцы доходили до -4,4 °С в первой половине года и до +1,1 °С во второй половине. Среднеквадратические ошибки по месяцам были от 3,1 °С в теплую половину года до 5,7 °С в холодную половину.

В то же время модель ECHAM4 во все месяцы года в среднем по Земле завышала температуру воздуха, но ошибки были меньше, чем у модели CGCM2. Наименьшие средние ошибки были весной, от 0,1 до 0,5 °С, а в остальную часть года не более 1,8 °С. Среднеквадратические

ошибки этой модели во все месяцы были меньше, чем у модели CGCM2 и укладывались в интервал от 2,8 до 3,8 °С.

Модель HadCM3 во все месяцы в среднем по Земле занижала температуру воздуха. Средняя ошибка была от -0,5 °С летом до -3,8 °С зимой. Среднеквадратическая ошибка – от 2,9 до 4,0 °С.

Лучшие результаты показывают значения SUM, осредненные по всем трем моделям (табл. 5.2). Обобщенная модель SUM получена осреднением соответствующих значений трех моделей в каждой точке. В этой модели уменьшается систематическое смещение модельных значений относительно результатов наблюдений, средние ошибки по объединенной модели составляют от -2,0 до +0,4 °С. Ошибка среднегодовых значений по осредненной модели близка к нулю (0,05 °С). Однако среднеквадратические ошибки (табл. 5.1) остаются большими по каждому отдельному месяцу и по среднегодовым значениям.

Различия в работе исследуемых моделей становятся более заметными при анализе пространственных особенностей ошибок.

По узлам $2 \times 2^\circ$ вычислены средние за 16 лет месячные значения температуры (за 1990–2005 гг.), за те же годы вычислены средние месячные температуры по данным моделей и получены разности (из модельных значений вычтены значения, полученные из наблюдений на станциях, пересчитанные в узлы). В табл. 5.1 и 5.2 приведены обобщенные данные об ошибках моделей, здесь приведем пространственное распределение отклонений модельных среднегодовых значений от фактических. Как и прежде, сравнивались многолетние среднегодовые модельные и фактические значения, полученные осреднением за 1990–2005 гг. На рис. 5.2 показаны отклонения модельных данных по CGCM2.

Модель CGCM2 преимущественно занижает вычисляемую температуру. Отрицательные отклонения – в большей части Евразии, Африки, Австралии, Южной Америки, на юге Северной Америки и в Гренландии.

На рис. 5.3 показаны отклонения модельных данных по ЕСНАМ4. Эта модель чаще завышает вычисляемые среднегодовые значения температур. Положительные отклонения до 1–3 °С наблюдаются и преобладают на всех континентах, а заниженные значения

по модели ECHAM4 от -3 до -4 °C наблюдаются в районах высочайших гор Азии, на севере Кордильер в Северной Америке и в Гренландии. На рис. 5.4 показаны отклонения модельных данных по HadCM3.

Модель HadCM3 дает преимущественно заниженные значения среднегодовой температуры, которые охватывают почти все Северное полушарие и западные части материков Южного полушария (районы Анд, юго-запад Африки и запад Австралии. В других районах Южного полушария Земли модель HadCM3 дает завышенные значения.

Осреднение данных трех моделей дало несколько улучшенный результат. На рис. 5.5 показаны отклонения модельных данных по обобщенной модели SUM.

Обобщенная модель дает ошибки в тех же пределах, которые упоминались выше, но ошибки в крайних положительных и отрицательных грациях на Земле встречаются реже. Заниженные значения обобщенная модель дает от -4 до -5 °C в районах высочайших гор Азии, на севере Кордильер в Северной Америке и в Гренландии. Завышенные значения на +3 °C модель дает в районе Персидского залива, на юго-западе Африки и в устьях рек Амазонка и Парана в Южной Америке.

При таких ошибках применимость моделей к оценкам регионального климата возможна с большими ограничениями. Там, где модельные оценки предстоящих изменений климата меньше ошибок моделей, использование моделей не имеет смысла.

Модели климата постоянно развиваются, и создаются новые модели. Для сравнения их работы с реальными изменениями климата и для выбора наилучших создана международная программа CMIP (Coupled Model Intercomparison Project <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/index.php>). Это программа исследования соответствия модельных оценок реальным особенностям изменений климата. Анализируется способность моделей воспроизвести сезонные и месячные средние, внутрисезонные изменения, явление Эль-Ниньо, Арктическое колебание и др.

Закончена третья фаза проекта CMIP3. В ней участвовали 25 моделей, которые приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

Модели климата из проекта СМIP3 (2007 год)

Наименование организации	Страна	Наименование модели
1. Beijing Climate Center	Китай	BCC-CM1
2. Bjerknes Centre for Climate Research	Норвегия	BCCR-BCM2.0
3. National Center for Atmospheric Research	США	CCSM3
4. Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Канада	CGCM3.1(T47)
5. Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Канада	CGCM3.1(T63)
6. Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques	Франция	CNRM-CM3
7. CSIRO Atmospheric Research	Австралия	CSIRO-Mk3.0
8. CSIRO Atmospheric Research	Австралия	CSIRO-Mk3.5
9. Max Planck Institute for Meteorology	Германия	ECHAM5/MPI-OM
10. Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group.	Германия / Корея	ECHO-G
11. LASG / Institute of Atmospheric Physics	Китай	FGOALS-g1.0
12. US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	США	GFDL-CM2.0
13. US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	США	GFDL-CM2.1
14. NASA / Goddard Institute for Space Studies	США	GISS-AOM
15. NASA / Goddard Institute for Space Studies	США	GISS-EH
16. NASA / Goddard Institute for Space Studies	США	GISS-ER
17. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	Италия	INGV-SXG
18. Institute for Numerical Mathematics	Россия	INM-CM3.0
19. Institut Pierre Simon Laplace	Франция	IPSL-CM4
20. Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Япония	MIROC3.2(hires)
21. Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Япония	MIROC3.2(medres)
22. Meteorological Research Institute	Япония	MRI-CGCM2.3.2
23. National Center for Atmospheric Research	США	PCM
24. Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	Великобритания	UKMO-HadCM3
25. Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	Великобритания	UKMO-HadGEM1

Сравнение моделей показало, что наиболее совершенные из них способны воспроизводить основные черты наблюдаемой атмосферной циркуляции с хорошей точностью. Но существуют систематические ошибки в воспроизведении климата, присущие практически всем моделям РАН [27].

В [66] приведены оценки ошибок по 16 моделям СМIP3 над территорией России. Над большей частью России МОЦАО занижают среднюю годовую температуру на $(-1,8 \pm 1,5) ^\circ\text{C}$. Наиболее заметной систематической погрешностью в холодный период является занижение температуры над северными регионами Европейской территории России и Западной Сибири. Эта погрешность может быть связана с занижением моделями температуры в Северной Атлантике, Норвежском и Баренцевом морях на $4-8 ^\circ\text{C}$ в течение всего года. Занижение температуры на северо-западе России особенно велико зимой $(-6,4 \pm 3,6 ^\circ\text{C})$.

Качество современных моделей общей циркуляции атмосферы может быть проиллюстрировано тем, как воспроизводит некоторые черты атмосферной циркуляции модель Института вычислительной математики РАН [27].

Среднегодовые ошибки воспроизведения зонально-осредненной температуры и зональной скорости ветра показали, что происходит занижение температуры вблизи тропопаузы в высоких широтах на $5-10 ^\circ\text{C}$. Причина такого поведения моделей на настоящий момент не ясна и нуждается в исследовании. В тропосфере величина ошибки воспроизведения температуры значительно меньше. В нижней тропосфере над Арктикой и Антарктикой температура завышена на $2-3 ^\circ\text{C}$, а в умеренных широтах Южного полушария во всей тропосфере, а также в тропиках в верхней тропосфере занижена на $1-2 ^\circ\text{C}$. В соответствии с ошибками воспроизведения температуры скорость западного ветра в нижней стратосфере в умеренных широтах завышена на $5-10 \text{ м/с}$, а скорость восточного ветра в тропиках в нижней стратосфере завышена на $4-8 \text{ м/с}$. Эти ошибки также характерны почти для всех современных моделей. В тропосфере величина ошибки скорости зонального ветра почти всюду не превосходит 2 м/с . [27].

Моделью ИВМ РАН хорошо воспроизводятся максимумы в зимнем полушарии на севере Тихого океана и Атлантики. Среднеквадратичное отклонение давления там, а также в целом по Северному полушарию, в модели примерно на 10% больше. В летнем полушарии, наоборот, изменчивость в модели занижена на $10-20 \%$, что обусловлено

недостаточным разрешением синоптических вихрей, которые в летнем полушарии более мелкомасштабны, чем в зимнем, и под воздействием которых в значительной степени формируется низкочастотная изменчивость. [27].

Анализ воспроизведения климата с помощью атмосферной модели более высокого разрешения по горизонтали ($2,5 \times 2^\circ$ по долготе и широте) показывает, что в летнем полушарии амплитуда высокочастотной и низкочастотной изменчивости становится близкой к наблюдаемой. Однако величина систематических ошибок воспроизведения среднего состояния климата, а также изменчивости в зимнем полушарии при увеличении пространственного разрешения не уменьшается. Это говорит о необходимости более точной настройки параметризаций модели, или о необходимости введения еще не учтенных физических механизмов. Как показано в [27], мировой опыт моделирования также в основном подтверждает, что величина систематических ошибок воспроизведения среднеклиматического состояния атмосферы не слишком сильно зависит от пространственного разрешения используемой модели.

Следующим шагом явилось сравнение совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Здесь основное внимание было обращено на воспроизведение поверхностной температуры и распределения морских льдов. Среднегодовая ошибка воспроизведения температуры поверхности океана, рассчитанная как осредненная за 80 лет разность между результатами совместной модели и данными наблюдений, оказалась несколько занижена (на $1-3^\circ\text{C}$) в приэкваториальном Тихом океане вследствие завышенной интенсивности апвеллинга, что характерно практически для всех современных моделей [27].

На $2-6^\circ\text{C}$ имеет место завышение температуры на северо-западе Атлантики, а также вблизи Японии, что связано с ошибками воспроизведения местоположения теплых течений Куроисио и Северо-Атлантического. В умеренных широтах Южного полушария завышение температуры обусловлено, по всей видимости, недостаточно хорошим воспроизведением компонент радиационного баланса на поверхности.

В целом, интегральная температура поверхности в модели (с учетом суши и морского льда) составляет 14,7 °С, что близко к оценке 15 °С [27].

Состояние климатической системы изменяется со временем, в этих изменениях есть составляющая со строго определенным периодом – сезонные колебания, вызываемые годовым ходом инсоляции при обращении Земли вокруг Солнца вследствие наклона экватора к эклиптике и эксцентриситета земной орбиты [57]. Важное место занимают интенсивные нерегулярные составляющие: глобальные колебания с периодами от недель до месяцев, включая приблизительно двухнедельный цикл колебаний зональной циркуляции атмосферы в умеренных широтах и автоколебания в системе атмосфера–океан с периодами порядка нескольких месяцев; междугодичные колебания с наибольшей интенсивностью с периодами 2–5 лет (26-месячный цикл в экваториальной стратосфере, Эль-Ниньо, 3,5-летние автоколебания северной ветви Гольфстрима) [57] и другие более длительные колебания. Ранее, например, упоминались 50–60-летние колебания в атмосфере высоких широт.

Новые более совершенные физико-математические модели описывают некоторые элементы естественных долгопериодных колебаний климата.

5.4. Естественные колебания климата в моделях

Как известно, физико-математические модели климата не учитывают возможных внешних факторов изменений климата, за исключением роста концентрации CO₂. В течение нескольких десятилетий среднегодовое количество CO₂ описывается монотонно возрастающей функцией. Возникает вопрос, что является возбудителем естественных многолетних колебаний при отсутствии внешних факторов? Годовой ход инсоляции? Других возбудителей модели не содержат.

Начальное поле параметров климатической системы, включая океан, содержит градиенты, которые в момент запуска модели приводят

в движение все ее параметры посредством физико-математических соотношений, составляющих суть модели – модельная климатическая система оживает. Начальные градиенты задают толчок всем процессам системы в направлении, выравнивающем все градиенты, подобно маятнику, который перед запуском был отклонен от вертикали и начал движение. В этом движении система, так же как и маятник, проходит точку равновесия по инерции и уходит от равновесия в другую сторону. Затем начинается движение в обратную сторону, опять в направлении к равновесию. Так начальные градиенты задают затухающие колебания климатической системы. Разные компоненты имеют разную инерционность, поэтому возникают колебания разной длительности. В глубинных процессах океана и в ледяном покрове периоды колебаний могут достигать тысячелетий, но эти колебания все равно были бы затухающими при отсутствии внешних возбуждающих колебаний. Если в модели затухания не происходит, то значит завышено действие положительных обратных связей в каких-то звеньях модели, что, возможно, искажает модельные естественные колебания климата.

Что вообще поддерживает долгопериодные колебания в климатической системе за все время ее существования? Высказывания о случайных процессах лишь прикрывает наши незнания. В природе не бывает ничего случайного. Убедительным доказательством этому являются законы самоорганизации, описанные в разделе 3.11 для колебательных систем со слабыми взаимодействиями на примере Солнечной системы. В неслучайности гармонии Солнечной системы трудно усомниться, а ведь до сих пор не удалось найти строгого математического описания движения всех планет.

Итак, вопрос об изменениях (колебаниях) климата опять сводится к вопросу о резонансах и внешних факторах. Недостаточность наших знаний о механизмах воздействия внешних факторов на климатическую систему и трудности их включения в модель не являются основанием для игнорирования естественных внешних факторов для естественных колебаний климатической системы.

Не следует ожидать прямых аналогий между частотами внешних факторов и колебаний в климатической системе. В главе 3 показано

что, на любые воздействия колебательная система может откликаться не только в виде вынужденных колебаний с теми же частотами, но и на других, ее собственных частотах. Хорошей аналогией являются удары в колокол, частота звуковых колебаний которого никак не связана с частотой ударов по нему.

5.5. Оценки вклада CO_2 в современные изменения климата

В ИВМ РАН проводился эксперимент по воспроизведению климата XX века и анализу чувствительности модели к изменению концентрации CO_2 [27].

В ходе этого эксперимента задавался реальный временной ход изменения концентрации в атмосфере углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O) – основных парниковых газов, связанных с антропогенной деятельностью. Предполагалось, что эти газы хорошо перемешаны, а их концентрация не зависит от пространственных координат. Кроме того, были заданы наблюдавшиеся изменения во времени долготно-широтного содержания сульфатного аэрозоля, меридионального распределения оптической толщины вулканического аэрозоля, а также солнечной постоянной. Был также проведен контрольный эксперимент, в котором содержание всех атмосферных составляющих не менялось во времени и соответствовало условиям 1871 года.

В эксперименте, моделирующем климат XX века, уже к середине века обнаружилось превышение температуры по сравнению с контрольным экспериментом. К концу века повышение температуры достигает $0,7\text{--}0,8\text{ }^\circ\text{C}$, что близко к наблюдаемому потеплению, которое составляет около $0,6\text{--}0,7\text{ }^\circ\text{C}$. В данных контрольного эксперимента потепление отсутствует. Это, по мнению авторов [27], означает, что наблюдающееся в XX веке потепление, вероятнее всего, обусловлено не естественными колебаниями климатической системы, а «внешними по отношению к ней воздействиями». Аналогичный вывод делается и по

результатам других моделей [29]. Под внешними воздействиями в работе подразумевается увеличение концентрации CO_2 , так как других внешних воздействий в эксперименте не было. На самом деле, такой результат был задан заведомо построением и настройкой модели в предположении, что углекислый газ является единственным фактором потепления климата.

Авторы работы [26] отмечают, что фундаментальный вопрос, какие характеристики и с какой точностью должна воспроизводить математическая модель климатической системы, чтобы ее чувствительность к малым внешним воздействиям была близка к чувствительности реальной климатической системы, остается до настоящего времени практически открытым.

В работе [25] проанализирован отклик совместной модели атмосферы и океана на увеличение атмосферной концентрации CO_2 и показано, что приблизительно третья часть величины современного потепления в холодное полугодие в Евразии объясняется изменением динамики атмосферы, а именно увеличением индекса арктической осцилляции.

Позднее установлено [26], что повышение температуры поверхности в климатических моделях при увеличении атмосферного содержания углекислого газа определяется в основном количеством тепла, расходуемым на прогрев океана, а также тем, насколько меняется радиационный баланс Земли в результате изменения облачности при изменении климата. Еще показано, что чувствительность многих современных совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана существенно завышена.

Из этого следует очень важный вывод о том, что роль усиления концентрации углекислого газа в современных изменениях климата существенно преувеличена. Современные модельные оценки вклада CO_2 в изменения климата согласуются с эмпирическими данными [88] о том, что изменение радиационного баланса объясняет от 7 до 49 % общей изменчивости трендов температуры воздуха сухой безоблачной атмосферы при повышении концентрации CO_2 и других парниковых газов (глава 4). А в работе [83] показано, что в высоких широтах вклад

усиления парникового эффекта в прирост температуры составляет около 14 %. Это как раз те широты, на которых наблюдается наиболее интенсивное потепление климата, и вклад усиления парникового эффекта теоретически должен быть максимальным. Аналогичные результаты получены за рубежом в работе [108]. При анализе среднегодовых значений глобальной температуры показано, что не меньше 60 % потепления климата начиная с 1970 года является результатом естественных циклов, которые существуют в Солнечной системе. На парниковый эффект CO_2 остается не более 40 %.

Это означает, что вывод Международной группы экспертов [96] о парниковой природе современного глобального потепления сильно преувеличен. Такие же выводы были в работах [40, 83] и приведены в разд. 1.2.

Сведения о недостатках физико-математических моделей приведены в настоящей главе не для того, чтобы признать их полностью ошибочными и бесперспективными, а для того, чтобы призвать к критической оценке результатов моделирования и продолжать совершенствование моделей. Особое внимание следует уделить построению моделей с учетом резонансных взаимодействий.

Учитывая многие неопределенности физико-математических моделей следует признать преждевременным их использование для прогностических целей с далеко идущими выводами о грядущей термической катастрофе на Земле.

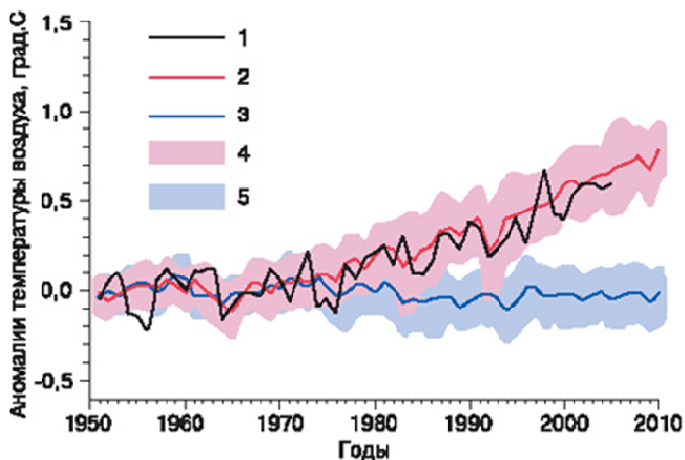
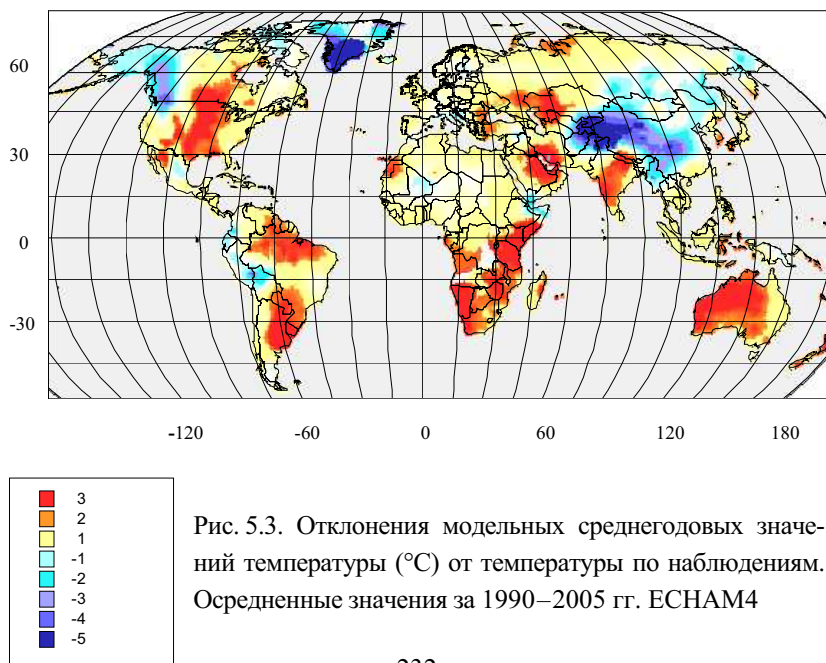
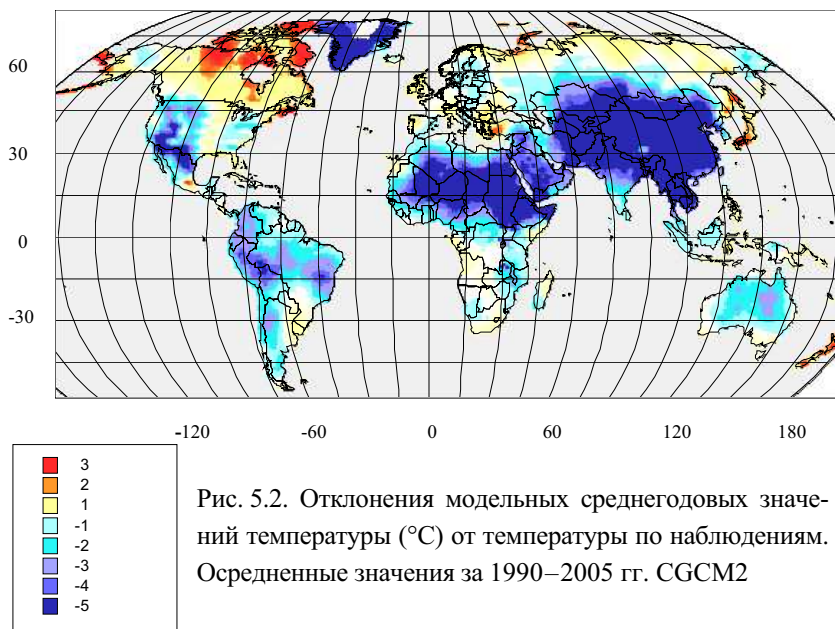


Рис. 5.1. Из работы [66] временной ход средней за год аномалии глобальной приземной температуры воздуха, рассчитанный по ансамблю физико-математических моделей и полученный по наблюдениям, по отношению к норме в период с 1951 по 1970 год: 1 – данные наблюдений; 2 – аномалия температуры, полученная по ансамблю из 16 моделей с учетом известного роста парниковых газов и аэрозоля; 3 – тот же расчет, но при значениях парниковых газов и аэрозоля, соответствующих доиндустриальному периоду. В широкие полосы (4, 5) при нормальном распределении разброса попадают 68 % модельных значений.



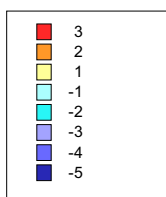
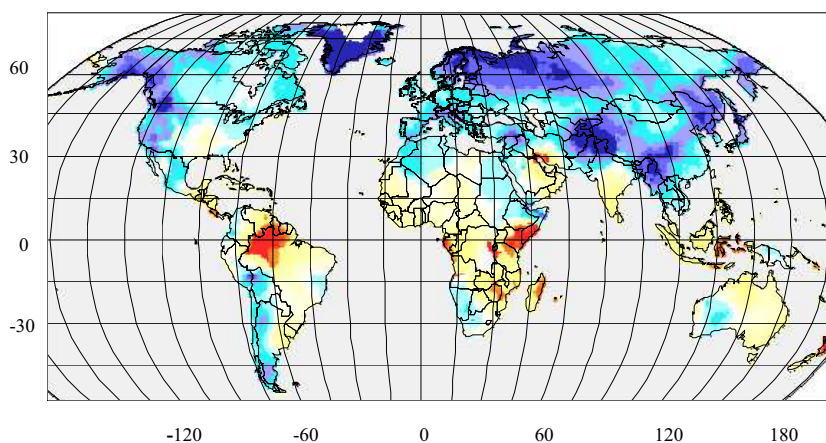


Рис. 5.4. Отклонения модельных среднегодовых значений температуры ($^{\circ}\text{C}$) от температуры по наблюдениям. Осредненные значения за 1990–2005 гг. HadCM3

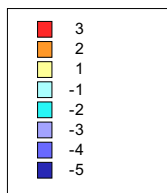
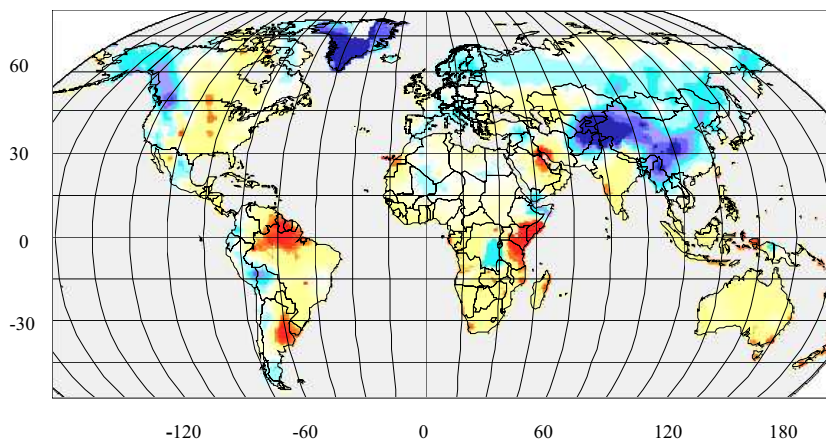


Рис. 5.5. Отклонения модельных среднегодовых значений температуры ($^{\circ}\text{C}$) от температуры по наблюдениям. Осредненные значения за 1990–2005 гг. SUM

Глава 6. Статистическая модель климата

6.1. Собственные, вынужденные и вынуждающие колебания

Глобальный и региональный климат на разных временных масштабах может характеризоваться изменением его состояния и колебаниями. Статистическая модель может строиться на базе глубоких знаний об особенностях этих изменений и колебаний. Следует учитывать, что колебания в атмосфере бывают собственные и вынужденные и свойства их различны.

Собственными, или свободными, называются колебания, которые совершает система около положения устойчивого равновесия после первоначального возмущения. Частоты этих колебаний определяются свойствами самой системы и не зависят от периодичности повторяющихся воздействий на систему. Эти колебания совершаются только за счет внутренних сил противодействия первоначальному возмущению.

А вынужденные колебания – колебания, происходящие под воздействием внешних сил, меняющихся во времени, с частотами вынуждающих колебаний.

И вынужденные и свободные колебания не возникают без вынуждающих воздействий. Различие заключается в том, что вынужденные колебания имеют период вынуждающих колебаний, а свободные колебания имеют собственные частоты, присущие системе, и связаны с возмущающим воздействием только временем начала – в момент возмущающего воздействия запускаются колебания системы на собственных частотах.

Простым примером запуска собственных колебаний, как уже говорилось, является удар в колокол. С момента удара возникают затухающие звуковые колебания сразу на нескольких частотах, присущих

данному колоколу. Несколько ударов в колокол столько же раз запустят серии колебаний на собственных частотах. Каждая новая серия колебаний будет накладываться на предыдущие собственные колебания и каждый раз в новой фазе после каждого удара в колокол. Суммарная картина колебаний будет довольно сложная. Анализируя частоты суммарной системы колебаний, нельзя будет обнаружить периода вынуждающих колебаний, так как между ними нет связи. Собственные частоты определяются свойствами самой системы и не зависят от воздействия.

Бессмысленны поиски корреляций между вынуждающими и собственными частотами.

При выборе методов статистического анализа необходимо знать свойства анализируемого объекта. Существует много стандартных классических методов статистического анализа и описания временных рядов, пригодных для простых случаев. Колебания в климатической системе к простым случаям не относятся, поэтому очень легко получить вывод об отсутствии каких-либо периодичностей или о наличии огромного количества периодичностей, что практически тоже трактуется как отсутствие реальных периодичностей.

Атмосфера – наименее инерционная составляющая климатической системы и потому наиболее легко реагирует на внешние изменения (воздействия). Ее реакция проявляется во всем спектре ее собственных частот. Воздействие на атмосферу каждого возмущения от разных составляющих климатической системы и от внешних факторов сопровождается каждый раз запуском новой серии собственных возмущений в атмосфере. Колебания на собственных частотах при каждом новом запуске имеют новую фазу колебаний. Происходит наложение новых колебаний на затухающие старые колебания. При этом возникают интерференция, биения и т.д. По метеорологическим данным можно наблюдать только результирующую картину. Выделить из таких данных частоты собственных колебаний крайне сложно, так как их фазы изменяются.

Ситуация осложняется тем, что одновременно с собственными колебаниями в атмосфере возникают вынужденные колебания с частотами вынуждающих колебаний.

Итак, периодические внешние воздействия на атмосферу сопровождаются одновременно вынужденными и собственными колебаниями с разными периодами, с переменными фазами и амплитудами и даже с переменным набором собственных частот в разных сезонах года, со знакопеременной реакцией вынужденных колебаний на вынуждающие колебания.

При таких свойствах системы применять статистические методы необходимо крайне осторожно.

До сих пор мы условно говорили о тех сложностях в колебаниях атмосферных характеристик, которые возникают при периодических внешних (по отношению к атмосфере) воздействиях. Но теперь необходимо уточнить, что периодических вынуждающих колебаний в климатической системе не бывает, существующие вынуждающие воздействия можно назвать только квазипериодическими и только на некоторых ограниченных отрезках времени. А на больших интервалах в них обнаруживаются те же свойства, которые присущи суммарным колебаниям, состоящим из собственных и вынужденных колебаний. Получается, что непредсказуемые серии внешних возмущений каждый раз производят воздействие, которое сопровождается серией непредсказуемых возмущений в атмосферных характеристиках.

Отсутствие четких представлений об описанных выше закономерностях формирования колебаний в атмосферных характеристиках многие годы приводило к поспешным выводам о случайности всего происходящего в атмосфере. Действительно в природе нет тех простых закономерностей, которые многие годы были предметом поиска в статистическом анализе. Например, если возникала гипотеза о повторяющихся возмущениях во временном ряде, то методом спектрального анализа оценивалась достоверность периодических процессов. При этом для большей надежности результатов в анализе использовался максимально возможный по длительности временной ряд. В результате получался статистически достоверный, но методически ошибочный вывод о том, что колебания во временном ряде не являются периодическими, а значит – случайны. Методических ошибок в

таком анализе было несколько. Во-первых, повторяющиеся возмущения не обязательно должны быть периодическими – это может быть серия взаимосвязанных возмущений через разные промежутки времени. Во-вторых, даже периодические возмущения не обязательно должны существовать бесконечно долго, как это желательно для надежности получения статистических оценок. В-третьих, периодические колебания при наложении дополнительных факторов могут со временем изменять знак или фазу, период может постепенно растягиваться или сжиматься. Например, на границе океан–атмосфера неизбежно происходят медленные изменения периода колебаний потоков тепла вместе с изменением тепловой инерционности верхнего слоя взаимодействия океана с атмосферой, а инерционность изменяется в зависимости от изменяющейся толщины верхнего слоя перемешивания.

К настоящему времени накоплено много сведений о поведении климатической системы, из которых вытекает необходимость поиска других закономерностей другими методами.

При всей сложности и многофакторной зависимости процессов в климатической системе колебания в атмосфере некоторым образом все же самосогласуются и возникают ритмы, которые легче поддаются выделению. Согласование формирует избранные собственные частоты свободных колебаний каждой составляющей климатической системы. Способность сложных колебательных систем к самосогласованию – это результат естественной оптимизации системы по минимуму затрат энергии. Резонансное самосогласование является фундаментальной закономерностью эволюции и устройства современной Солнечной системы. Вероятно, на основе тех же законов физики о слабых взаимодействиях в колебательных системах наша климатическая система в результате длительной эволюции тоже вышла в резонансный режим с внешними факторами и между отдельными своими составляющими. Самосогласование выводит колебательную систему на оптимальный резонансный уровень.

Сомневаться уже невозможно в том, что космические факторы хотя бы в ничтожно малом количестве влияют на земные процессы,

есть немало доказательств существенного влияния. Но даже если влияние космоса на земные процессы неимоверно слабое, оно неизбежно направлено на синхронизацию земных и космических процессов.

Любая сложная колебательная система, существующая достаточно количество времени, неизбежно стремится к самосогласованию. Вопрос заключается в том, какое время является достаточным для каждой составляющей климатической системы и на какой фазе согласования она находится в наше время. Солнечной системе понадобились миллиарды лет для выхода на современный уровень гармонии в движениях планет и спутников. Судя по тому, что в атмосфере существуют ритмы, самосогласование в климатической системе в некоторой мере произошло.

6.2. Периодичность, цикличность, ритмичность

В разное время и разные авторы писали о ритмических свойствах атмосферных характеристик, начиная с Б.П. Мультановского, однако до сих пор много осталось неясного в этой проблеме. Прежде всего нет ясности в происхождении многомесячных и многолетних ритмов, продолжительность и устойчивость ритмов различна в разных регионах и непостоянна за историю наблюдений. Однако теперь накопленные знания о ритмах и свойствах климатической системы позволяют предложить новую интерпретацию причин непредсказуемых колебаний в атмосферных характеристиках. В задаче моделирования колебаний климата наибольший интерес представляют многолетние ритмы.

Явления ритмичности относятся к фундаментальным закономерностям природы. Необходимо различать три категории явлений: периодичность, цикличность и ритмичность. Периодичность подразумевает равные временные интервалы, цикличность – возвращение системы в исходное положение, хотя бы и через разные промежутки

времени, ритмичность никогда не бывает хронологически строга и никогда не приводит систему точно в исходное состояние. Ритмы чаще всего проявляются как неправильные колебания, не сохраняющие ни средний период, ни амплитуду. По А.В. Шнитникову, ритмичность присуща всем явлениям космического пространства в их изменениях от нескольких лет до многих тысячелетий [52]. Понятия ритмичности и цикличности часто ошибочно употребляют как синонимы.

В объяснениях причин ритмичности природных явлений давно сложилось как минимум два подхода.

Первый сводится к тому, что ритмические колебания возникают в результате сложения нескольких неустойчивых гармонических колебаний – это результат сложения случайных причин, следовательно, ритмы являются по сути случайными.

Второй подход основан на утверждении о том, что каждый из всего множества природных ритмов имеет свою физическую причину, ритмы – это неотъемлемое свойство природных процессов.

Истина лежит посередине. Не все наблюдаемые циклы должны иметь физическую причину. В метеорологических показателях часть ритмов может быть отражением свойств природных процессов, но другая часть ритмов должна возникнуть в результате суперпозиций разных колебаний или в результате отражений и различных взаимодействий в климатической системе. Во времени и пространстве циклы распадаются на обертоны или соединяются в более длительные.

В зависимости от того или иного взгляда на причины ритмичности метеорологических процессов зависят способы их выделения.

В исследованиях ритмов возникают большие трудности при доказательстве их реальности классическими статистическими методами (см. раздел 6.1). Поэтому при исследовании ритмов их нельзя исследовать как периодический процесс, необходимо предварительно проанализировать их временную структуру, чтобы сознательно выбрать статистические приемы для оценки их достоверности при известных свойствах и отличиях от периодичности. Ритмы современного климата во времени в пространстве и в годовом ходе появляются и исчезают,

трансформируясь в другие ритмы (чаще с более длинным или вдвое коротким средним периодом), а иногда просто сменяются другими колебаниями [21]. Применяя к таким ритмам стандартные методы анализа периодичности, некоторые исследователи приходят к выводу об отсутствии ритмов, хотя правильнее было бы делать вывод о том, что им не удалось найти классической периодичности, а ритмы надо искать другими методами. Поиск ритмов должен осуществляться целенаправленно на основе физической гипотезы, а обнаружение и подтверждение гипотезы их происхождения будет способствовать лучшему пониманию процессов в климатической системе и созданию общей теории Земли. В противоположность этому вероятностный подход к динамике природной среды не приносит новых знаний о процессах на Земле [52].

Ритмы теряются при анализе по слишком длинным интервалам, в пределах которых происходит смена ритмов по периодам или по фазам. Нельзя объединять в один ряд значения разных месяцев года, так как они имеют разную ритмику [21].

Различия в ритмике разных месяцев объясняются своеобразным сезонным фильтром, который описан далее.

6.3. Сезонный частотный фильтр ритмов

Понимание сути сезонного фильтра крайне важно для построения статистической модели климата.

Б.П. Мультановским [62] было введено понятие естественного синоптического периода и естественного синоптического сезона. С.Т. Пагава [67] существенно развил представление об этих понятиях, он показал наличие связи между сменой синоптического периода в Европейском районе и характером теплообмена в Северной Атлантике. Это очень важный факт для понимания взаимодействий в климатической системе.

В течение естественного синоптического сезона сохраняются некоторые общие характерные черты атмосферной циркуляции, отражающие сложившееся взаимодействие между атмосферой и океаном, и сохраняются положение и интенсивность центров действия атмосферы. Естественный синоптический период, естественный синоптический сезон – это представления, основанные на характерных свойствах атмосферных процессов и циркуляции. Одним из свойств таких представлений является некоторое квантование состояний атмосферы во времени. Атмосферная циркуляция в своих изменениях часто возвращается к подобным состояниям, но эти изменения происходят неплотно периодически, а, скорее, ритмически. Одно состояние атмосферной циркуляции с некоторыми общими характерными чертами сохраняется дольше, чем происходит переход к другому состоянию. Ритмы – фундаментальное свойство климатической системы.

Атмосферные преобразования не происходят изолированно, они являются составной частью изменений в климатической системе. Отдельные элементы климатической системы могут накапливать и освобождать огромные количества энергии во временных масштабах от нескольких дней до столетий (океан и ледники) [71].

В исследованиях на основе статистического анализа недостаточно внимания уделяется известным сезонным перестройкам атмосферной циркуляции. Способность атмосферы квантоваться по сезонам обычно заменяется предположением плавных изменений метеорологических элементов в годовом ходе. Однако плавный годовой ход бывает только в значениях метеорологических элементов, осредненных за много лет по календарным датам, где границы сезонов сглажены. Квантовые сезонные свойства атмосферной циркуляции приводят к квантовой реакции атмосферы на те или иные внешние воздействия.

Сезонные особенности атмосферной циркуляции хорошо известны. Во внетропических широтах существуют зимние, летние и другие типы сезонной атмосферной циркуляции. В разных сезонах изменяются положение центров действия атмосферы, траектории движения барических образований и т.д. [15, 19]. Погодные условия в

регионе определяются в значительной мере типом пришедшей воздушной массы. Для каждого полушария Земли можно выделить три основных класса воздушных масс [68]: тропический воздух, воздух умеренных широт и полярный воздух. Очагами формирования тропического воздуха служат зоны пассатов Северного и Южного полушарий, ограниченные поясами субтропических антициклонов обоих полушарий. Полярный воздух Северного полушария формируется в арктических и субарктических районах, а полярный воздух Южного полушария формируется в антарктических и субантарктических районах. Воздух умеренных широт занимает пространство между зонами полярного и тропического воздуха. Воздушные массы отличаются не только значениями метеорологических элементов, но и факторами, их формирующими, с разным набором циклических составляющих и с различными статистическими и прогностическими свойствами.

В тропических широтах годовой ход в метеоэлементах практически отсутствует, атмосферная циркуляция не имеет ярко выраженных сезонных особенностей, квантование свойств атмосферы по сезонам здесь отсутствует. Благодаря этому в тропиках меньше препятствий для развития долгопериодных колебаний, например таких, как Южное колебание или квазидвухлетний цикл в экваториальной стратосфере. Из тропиков колебания должны передаваться в соседние, более высокие широты. Но сезонные различия в атмосферной циркуляции умеренных широт создают своеобразный частотный фильтр колебаний. Фильтр выделяет колебания в зависимости от близости периода к значению, кратному длительности одного года. Из низких широт в умеренные могут передаваться только те волны, которые начинаются и заканчиваются в одноименном сезоне. Колебания, период которых выражается целым числом лет, имеют преимущества, по сравнению с периодами других значений.

Колебания с периодами, не кратными году, будут трансформированы фильтром в более долгопериодные возмущения. Статистическая связь будет утеряна между колебаниями в низких и умеренных широтах. Так, возмущения из тропиков с периодами T_1 , не кратными

году, могут проявляться во внетропических широтах с периодами T в n раз длиннее исходных тропических возмущений.

$$T = nT_1,$$

где nT_1 – целое число лет при минимальном целом числе n .

Такой же частотный фильтр работает при взаимодействии атмосферы и океана. Возможно, такой же частотный фильтр работает в восприимчивости других внешних воздействий, включая космические.

Итак, на основе известных сезонных свойств атмосферы очевидно, что долгопериодные внешние воздействия на атмосферу могут приводить к отнотипным погодным изменениям внетропических широт только в одноименных сезонах, при одинаковых сезонных условиях атмосферной циркуляции. Внешнее циклическое воздействие на внетропическую атмосферу возможно только на определенных частотах, кратных одному году, или через интервал времени nT . Это означает, что воздействие с периодом, например, 2 года, будет проявляться в атмосфере через 2 года, воздействие с периодом 2,5 года будет проявляться в атмосфере аналогичного сезона только через 5 лет, а воздействие с периодом 2,2 года – через 11 лет, и т.д. Наличие своеобразного частотного фильтра приводит к тому, что в атмосфере не обнаруживаются колебания с частотами вынуждающих колебаний, но возникают ритмы с интервалами, в несколько раз превышающими периоды вынуждающих колебаний. Например, если бы в глубинах океана существовал цикл с периодом 18 месяцев, то во внетропической атмосфере он бы проявлялся не каждые 18 месяцев, а только через 3 года (36 месяцев); аналогично, циклическое воздействие с периодом 20 месяцев проявлялось бы только через 5 лет (60 месяцев), и т.д.

Несколько примеров проявления сезонного частотного фильтра приведены далее.

Наличие сезонного частотного фильтра легко заметить при сравнении внутригодовых межмесячных связей температуры воздуха и межгодовых связей температуры в одноименных месяцах. На рис. 6.1 показана автокорреляционная функция месячных аномалий температуры воздуха в г. Москве по данным за 1951–2000 гг. Аномалии

температуры вычислены путем исключения среднего годового хода за 1951–2000 гг.

Из рис. 6.1 видно, что при сдвиге на один месяц коэффициент корреляции составляет 0,2 и при больших сдвигах быстро уменьшается. Начиная со сдвига 5 месяцев, корреляция близка к нулю. Автокорреляционная функция вычислена за период 1951–2000 гг. Если вычислять автокорреляционную функцию за более короткие интервалы лет, то в некоторые годы появляются отрицательные корреляции при сдвиге 5–7 месяцев и далее, опять коэффициенты корреляции приближаются к нулю или переходят в положительную область. Внутригодовые межмесячные связи всегда слабые.

Другую картину дает анализ рядов, составленных из данных одноименных месяцев. Для примера, на рис. 6.2 показана автокорреляционная функция многолетнего хода месячных аномалий температуры воздуха в марте в Москве. Мартовские значения аномалий температуры воздуха обрабатывались за тот же период 1951–2000 гг. Из этого рисунка видно, что корреляция со значениями коэффициента 0,2–0,3 обнаруживается при сдвигах (в годах): 1, 7, 11, 17, 24. Значения коэффициента автокорреляции при указанных сдвигах остаются всегда выше, чем на рис. 6.1 для внутригодовых асинхронных связей. Март выбран как один из типичных примеров. Отсутствие связей через 2–5 месяцев и их появление через несколько лет является следствием сезонного частотного фильтра, о котором было сказано выше. По другим месяцам также наблюдаются локальные максимумы автокорреляционной функции со значениями 0,2–0,3, но при других сдвигах. Это означает, что многолетний ход температуры каждого месяца формируется разными наборами циклов в соответствии с разными состояниями и свойствами атмосферной циркуляции в месяце или сезоне. Долгопериодные связи в температуре заметны в температурных данных одноименных месяцев, но не обнаруживаются, когда анализ проводится без учета циркуляционных сезонных особенностей. Приведенные выше факты, видимо, являются отражением сезонных особенностей взаимодействия отдельных элементов климатической

системы. Подобная картина наблюдается и по другим метеорологическим станциям.

Изменяющиеся циркуляционные особенности каждого сезона и даже каждого месяца не позволяют некоторым колебательным процессам выйти за пределы одного – трех месяцев. Короткопериодные колебания, не выходящие за пределы сезона, позволяют строить только краткосрочные и среднесрочные прогнозы погоды. Долгосрочные прогнозы среднемесячной температуры следует строить на основе долгопериодных колебаний в рядах температур, составленных из погодичных среднемесячных значений одноименных месяцев. Данные других месяцев для этих целей менее информативны. Это замечательное свойство можно использовать для прогноза обобщенных за месяц значений метеовеличин с годовой и более заблаговременностью.

Между короткопериодными и долгопериодными колебаниями в атмосфере существует принципиальное различие. В течение года в каждом сезоне мы имеем дело с разными по своим свойствам воздушными массами и слабыми межсезонными взаимосвязями, а межгодовые изменения данных одноименных месяцев – результат долгопериодных колебаний элементов климатической системы. В течение года вместе с сезонами изменяются региональные свойства атмосферы – смещаются центры действия атмосферы, изменяются направления воздушных потоков, изменяется взаимодействие атмосферы и океана. Во всех случаях это колебательные процессы со своей системой собственных и вынужденных колебаний. Смена сезона приводит к смене погодообразующих факторов, к смене региональных колебательных процессов. Без учета этого не найти длительных прогностических зависимостей.

В статистическом смысле при переходе от одного сезона к другому нарушается стационарность аномалий температуры, изменяется статистическая структура. Это видно на примере асимметрии распределения температуры в Москве за июль и январь (рис. 6.3 и 6.4) по данным за 1900–2000 гг. Гистограммы показывают, что в январе асимметрию создают редкие, но очень значительные отрицательные

аномалии температуры, а летом асимметрия противоположного знака создается значительными редкими потеплениями.

Аналогичная картина наблюдается по другим регионам. Промонстрированные изменения статистических свойств важнейшей атмосферной характеристики (температуры воздуха) являются следствием существенных сезонных различий в свойствах атмосферной циркуляции, которые приводят не только к количественному изменению средней месячной температуры воздуха от зимы к лету, но и изменяют колебательные свойства температуры от зимы к лету.

Важные результаты, подтверждающие наличие сезонного частотного фильтра, приведены в обзоре Т.В. Покровской [72], где на примере показано, что определенные атмосферные процессы могут происходить только в своем характерном сезоне и прекращаются в другом сезоне. Дробные (в годах) интервалы для циклов не характерны. Показано [72], что известный квазидвухлетний цикл экваториальных ветров в стратосфере не всегда может реализоваться за два года, в силу различных помех может произойти задержка или на восходящей, или на нисходящей ветви, и тогда цикл завершится в следующем благоприятном сезоне. Это приводит к растягиванию цикла от двух к трем годам вследствие неблагоприятных условий других сезонов. Это замечено в экваториальной зоне, где сезонный ход слаб, тем более подобного явления с циклами следует ожидать в умеренных широтах с выраженными сезонными циркуляционными особенностями.

Итак, при анализе долгопериодных колебаний предпочтительнее использовать временные ряды многолетних данных только одноименных месяцев или сезонов. К таким же выводам приводят сведения из главы 3 о резонансных частотах, кратных длительности одного года. Поэтому для статистической модели климата целесообразно искать межгодовые циклические зависимости. И такие зависимости уже использовались. Так, например, Ю.М. Алехин [2] для прогнозирования гидрологических характеристик предлагал использовать автокорреляционные функции. Он отмечает, что коэффициенты автокорреляций являются циклическими.

С учетом изложенного нами был разработан метод прогноза колебаний климата, в котором принцип простой авторегрессии заменен выявлением квазипериодических ритмических возмущений и последующей череды непериодических изменений во временных рядах метеорологических величин.

Проблема сезонности не единственная, которая накладывает ограничения на использование результатов наблюдений. Существует проблема учета неустойчивости циркуляционных особенностей и изменения самих прогностических связей со временем. Прогностические связи нарушаются на границах циркуляционных эпох, впервые замеченных Г.Я. Вангенгеймом в 1948 году. С давними работами не всегда принято было считаться, однако позднее на основе методов качественной теории динамических систем со странными аттракторами была обнаружена способность атмосферы почти скачкообразно изменять свои статистические свойства [47]. Это те же квантовые свойства атмосферных состояний. По сути, это новый взгляд на известные циркуляционные эпохи и еще одно доказательство их существования. Происхождение циркуляционных эпох не ясно, но с их существованием необходимо считаться.

6.4. Ритмы климатической системы

Анализ метеорологических рядов, в целях выделения в них периодических изменений, стали производить сразу с накоплением материалов наблюдений еще в начале XX века. Казалось, что, зная все периоды в явлениях погоды, будет легко прогнозировать будущие погодно-климатические условия на большие сроки. В результате анализа разными авторами были найдены колебания в атмосферных процессах со всевозможными периодами. Однако амплитуды выделенных колебаний были слишком малы, а периоды их – крайне неустойчивы. Очень часто такие результаты истолковывались как отсутствие

каких-либо повторяющихся закономерностей во временных рядах. Строгая периодичность действительно отсутствовала, а понятие о ритмичности еще не сформировалось. Много позже – 60–70-е гг. XX века – история повторилась, когда внедрение вычислительной техники дало неограниченные возможности в поисках периодичностей, а методов для выделения ритмов не появилось. И опять после бесплодных попыток выявления периодичностей многие ученые стали рассматривать атмосферные процессы как случайные. Сложные взаимосвязанные процессы в климатической системе, наличие множества квазипериодических возмущений с переменной амплитудой и даже фазой, а также появление их суперпозиций не укладывались ни в один из классических методов статистического анализа. Теория случайных процессов хорошо описывала результаты наблюдений без периодичностей, но не давала шансов для построения методов прогноза погоды и климата.

Теперь с учетом гипотезы о резонансных взаимодействиях между отдельными составляющими климатической системы и о резонансном воздействии внешних факторов на климатическую систему становится очевидным, что отсутствие закономерностей в результатах статистического анализа многих исследователей является следствием недостатка знаний для правильной постановки статистического анализа.

Океан можно гипотетически рассматривать как возможный ближайший источник долгопериодных ритмов, задающих серии непериодических возмущений в атмосфере. При этом нельзя исключать из рассмотрения другие прямые возможные источники ритмов в атмосфере, таких, как неравномерность углового вращения Земли, возмущения в орбитальном движении Земли, другие геодинамические факторы и внешние воздействия.

Учет взаимодействия атмосферы и океана давно стал основой для долгосрочных прогнозов во многих методах. Учет аномалий температуры воды в северо-восточном районе Атлантики [90] при прогнозах погоды на ЕТР является основной концепцией в ряде работ [7, 9, 76, 82]. В них показано, что возникновение ситуаций блокирования,

эволюция гребней относительной топографии и другие существенные признаки макрометеорологических процессов связаны с тепловым влиянием океана. Блокирование – это тоже элемент квантования атмосферных состояний.

По А.Л. Кацу [32–34], изменение интенсивности и положения высотных ложбин и гребней над Северной Атлантикой под влиянием аномалий термического режима океана сказывается на возникновении и устойчивости форм атмосферной циркуляции над ЕТС и Западной Сибирью. Совершенно новым у него является предположение об обусловленности самого процесса формирования аномалий температуры воды в океанах фазой квазидвухлетнего цикла атмосферной циркуляции, т.е. явлением, имеющим глобальный характер. Наличие некоторого глобального регулятора региональных состояний атмосферной циркуляции, воздействующего на циркуляцию циклически, может послужить основой для региональных климатических прогнозов.

Несмотря на плавный годовой ход среднесуточной инсоляции, общая циркуляция атмосферы имеет свойства сохранять в течение сезона направления основных воздушных потоков и положение центров действия атмосферы, а затем резко переходить на другой режим, соответствующий следующему сезону. Об этом известном факте также можно условно сказать, что атмосферная циркуляция имеет свойства квантоваться по сезонам. Длительность времени, в которой сохраняются все основные свойства атмосферной циркуляции, можно назвать квантом циркуляции-сезона. Промежутки между такими единицами длительно-сти – величина не постоянная. Многими авторами было установлено, что границы естественных синоптических сезонов существенно изменяются (колеблются) с годами и зависят от индивидуальных особенностей каждого года. В первом естественном синоптическом районе Б.П. Мультиановским выделено шесть сезонов: зима, весна, первая и вторая половина лета, осень и предзимье. Во втором районе найдены другие шесть сезонов: первая и вторая половина зимы, весна, лето, осень и предзимье. Каждому естественному синоптическому сезону свойственны своя географическая локализация и интенсивность

тропосферных источников и стоков тепла, свои особенности теплообмена между высокими и низкими широтами, между океаном и континентом. Третий синоптический район – за пределами России.

Способность атмосферной циркуляции квантоваться по сезонам хорошо известна, обычно это называют способностью атмосферной циркуляции скачкообразно переходить из режима циркуляции одного сезона в другой режим, характерный для следующего сезона, суть от этого не меняется. Вторым примером квантования может быть циркуляционная эпоха – это наиболее крупная стадия процесса развития атмосферной циркуляции с определенным характером межгодового и внутригодового макропреобразования циркуляции, формирования и распределения термобарических полей на полушарии [14]. Приведенные физические особенности синоптических сезонов имеют важное значение в современных подходах при разработке методов долгосрочных метеорологических прогнозов и при анализе колебаний климата.

Существует другой – вероятностный – подход к пониманию климатических процессов. Если не затрагивать внешних воздействий (включая антропогенные) на климатическую систему, то проще считать, что колебания климата – это естественные колебания сложной системы на ее собственных частотах, которые проявляются в многолетних изменениях среднегодовых значений гидрометеорологических величин. Внутри года существует некоторый средний годовой ход температуры и всех других гидрометеорологических величин и случайные отклонения от него.

В этом подходе беспорядком является только годовой ход, все другие изменения, колебания и отклонения незаслуженно относятся, по сути, к числу случайных явлений. Такой подход отражает уровень знаний о причинах колебаний климата, но не законы формирования и колебаний климата. При таком понимании нет смысла строить модели для прогноза климата. Случайные колебания прогнозировать нет возможности. Но так ли они случайны?

Если существуют колебания климата на собственных (характерных) частотах, то что является источником их возмущений? Почему

эти возмущения не затухают на протяжении всего времени существования Земли? Ответ один – существуют некоторые источники, подпитывающие эти возмущения.

Атмосфера имеет климатическую память около двух недель, поэтому многолетние колебания климата нельзя отнести на счет собственных частот атмосферы. Атмосфера – составная часть климатической системы, это самая нестационарная ее часть, долгопериодная устойчивость атмосферы поддерживается другими составляющими климатической системы, такими, как океан и ледовый покров. Но периоды колебаний и этих составляющих климатической системы тоже конечны, любые колебания без подпитки рано или поздно должны затухнуть. Однако это не произошло на Земле за миллионы лет – это космические временные масштабы. Следовательно, внешние факторы изменений климата не должны исключаться из рассмотрения, если ставится задача построения физической модели изменений климата.

6.5. Выделение скрытых ритмов

Приведенные выше свойства климатической системы позволяют искать возможности для их использования в создании статистической модели климата. В [61] отмечается, что климатическая система Земли является неоднородной и нелинейной системой с достаточно широким диапазоном изменений и параметров в пространстве и во времени. Динамику полей климатических переменных различной природы усложняют их инерционные особенности. В [61] также отмечается принципиальная особенность климатической системы – наличие временной периодичности граничных условий. Это означает возможность наличия периодических изменений внешних условий, в которых развиваются атмосферные процессы, формирующие изменения полей температуры во времени.

Некоторые ученые считают учет цикличности в моделях климата бесполезным делом, так как всяких циклов и ритмов обнаружено

слишком много. Разложение колебаний на их гармонические составляющие и математическая экстраполяция хода на будущее до сих пор не давали существенных практических результатов.

Действительно, при достаточном количестве гармоник можно удовлетворительно описать любой ряд, но если использовались гармоники, не имеющие физической связи с рядом данных, то экстраполяция даст неверный прогноз. Однако многочисленные факты показывают, что колебательные, ритмичные явления в природе являются ее фундаментальной особенностью. Если атмосферные процессы содержат заметную ритмическую составляющую, то в них следует искать возможность прогноза развития этих процессов во времени. Следует учитывать, что избирательные частотные сезонные свойства атмосферы и наличие эпох циркуляции ограничивают применение теории случайных процессов для анализа и прогноза развития атмосферных процессов с большой заблаговременностью.

Опыт, накопленный за всю историю метеорологических исследований, и результаты, обобщенные в настоящей работе, позволяют построить прогностическую модель, уменьшающую степень неоднородности анализируемых данных, и на более однородном фоне отчетливее выявить повторяющиеся закономерности изменения во времени температуры воздуха.

Ритмы в атмосфере проявляются в виде набора колебаний, у которых с течением времени изменяется период, амплитуда и фаза. Каждые 2–3 соседних колебания еще похожи между собой, а далее картина меняется. В классическом понимании колебания носят случайный характер. Однако можно заметить серии некоторых «случайных» колебаний, повторяющиеся через одинаковые промежутки времени. Можно предположить, что имеется некоторый внешний периодический фактор, который задает серии непериодических возмущений в атмосфере. Для поля температуры внешними факторами могут быть изменения общей циркуляции атмосферы, процессы взаимодействия атмосферы с океаном, изменения скорости вращения Земли [80], космические факторы. Факт влияния океанов на долгопериодные возмущения

в атмосфере уже не надо доказывать, проблема в том, чтобы описать это влияние с достаточной достоверностью и заблаговременностью. Другие факторы менее изучены, но тоже возможны.

Каждое внешнее воздействие первоначально передается в поле температуры через цепочку нелинейных преобразований и многофакторных зависимостей в климатической системе. Далее в атмосфере возникает серия автоколебательных процессов с набором составляющих, соответствующих местным и сезонным особенностям. Каждое последующее внешнее воздействие ритмически задает в атмосфере новую серию колебаний, которая, накладываясь на предыдущую серию, нарушает начальную фазу автоколебаний, создает биения и т.д. Интервалы времени между воздействиями недостаточно велики, частая смена фазы не позволяет выявить гармонические составляющие серии вынужденных колебаний атмосферы. Увеличение интервала анализируемого ряда не позволяет найти периодичности из-за изменения начальных фаз составляющих. А если учесть, что внешнее воздействие на атмосферу представляет собой также набор колебаний разной природы и длительности, то выделение периодичностей в результирующих вынужденных колебаниях совсем становится невозможным.

В поисках получения достоверных результатов возникает противоречие между требованиями методов статистического анализа по увеличению длительности анализируемого ряда и природой колебаний, к которым эти методы применяются. К построению статистической модели климата необходимо подходить с учетом наличия естественного сезонного частотного фильтра атмосферных возмущений, который не сглаживает внутрисезонные колебания, а ограничивает их границами сезона однотипной атмосферной циркуляции. Продолжение колебаний, например, зимнего сезона бывает в последующие зимние сезоны, но не бывает в весенний или летний сезон. Весной наблюдаются другие колебания, свойственные весенним условиям атмосферной циркуляции и всей климатической системе, а их продолжение следует искать в последующих весенних сезонах и не раньше. И так далее для лета и осени.

Поэтому необходимо строить такой метод выделения ритмов, который из серии внешних вынуждающих колебаний выбирает только те, которые отстоят друг от друга на число лет, кратное году, т.е. атмосфера преимущественно реагирует только на воздействия, повторяющиеся через целое число лет.

Метод Шустера

Большая часть разработанных ранее методов для выделения периодичности мало применима к анализу временного хода климата. Исключением является забытый метод периодограмм, предложенный Шустером, который пригоден для простых случаев. Метод периодограмм является систематизацией последовательных попыток разложения ряда на интервалы всевозможных длин волн [22].

Рассмотрим временной ряд, который имеет N равноотстоящих значений какого-либо метеорологического элемента $y_1, y_2, y_3 \dots y_N$. Составим из последовательных членов ряда все возможные по длительности отрезки ряда: по 3 значения, по 4 значения, по 5 и т.д. В каждом случае получим n отрезков по p членов:

$y_1,$	$y_2,$	$y_3, \dots,$	y_p
$y_{p+1},$	$y_{p+2},$	$y_{p+3}, \dots,$	y_{2p}
$y_{2p+1},$	$y_{2p+2},$	$y_{2p+3}, \dots,$	y_{3p}
$y_{(n-1)p+1},$	$y_{(n-1)p+2},$	$y_{(n-1)p+3}, \dots,$	y_{np}

$Y_1,$	$Y_2,$	$Y_3,$	Y_p

Значения $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_p$ – средние по столбцам. Если в ряде $y_1, y_2, y_3 \dots, \dots y_N$ имеется ритм, длительностью p , то он сохранится и в ряде средних значений $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_p$, так как в каждом отрезке из p членов фаза ритма совпадает во всех столбцах. Сохранятся и ритмы длительностью, кратной p : $p/2, p/3$ и т.д. Случайные колебания и колебания других периодов окажутся со сдвинутой фазой в каждой строчке и при достаточном N полностью сгладятся. Число N не должно быть слишком большим, так как ритмы могут изменять свою длительность и при большом N будут сглажены и потеряны. Ярким

примером неосознанного использования этого метода является вычисление среднего многолетнего годового хода метеорологического элемента.

Амплитуда осредненного ряда $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_p$ будет максимальной при соответствии заданной длительности p реальной длительности ритма.

Далее в методе Шустера предполагается разложение в тригонометрический ряд осредненного ряда $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_p$ и определение периодов колебаний в осредненном ряде, оставшихся после подавления случайных колебаний относительно заданной длительности p . В нашем случае этот этап не требуется, так как в осредненном ряде предполагается обнаружить не только периодические колебания, но и серии последовательных непериодических возмущений, своим происхождением связанных с вынуждающими внешними периодическими колебаниями с периодом p .

Авторский метод выделения ритмов во временных рядах

Метод был предложен в [85] и подробно описан в [88]. Климатическая система является многофакторной, различные ее элементы содержат как вынужденные, так и вынуждающие колебания разной длительности. Долгопериодные колебания одних элементов и их нелинейные взаимосвязи с другими элементами климатической системы могут приводить к появлению вынужденных короткопериодных возмущений в атмосфере с совершенно непохожей на вынуждающие колебания статистической структурой. В нелинейных системах могут возникать неожиданные реакции на внешние воздействия. Эти короткопериодные вынужденные возмущения могут хаотически чередоваться на интервале одного периода вынуждающего колебания, а в следующем периоде вся черед, казалось бы, хаотических колебаний может повторяться. Такие возмущения подходят под определение ритмических. Ритм – это чередование каких-либо элементов, происходящее с определенной последовательностью. В природе существует полиритмичность. Однако многие из ритмов в климатической системе выражены слабо и обнаруживаются только при специальном анализе.

При перестройках процессов могут возникать новые доминирующие ритмы, которых не было прежде. Суперпозиция ритмов обуславливает сложную форму временных рядов.

Со статистической точки зрения вынужденные колебания можно описать моделью периодической нестационарности (терминология из [28]). Периодические вынуждающие колебания в каждом периоде задают серию непериодических вынужденных возмущений. Принято считать [28], что временной ряд обладает периодической нестационарностью, если весь ряд и любой его отрезок не стационарны, но ряд делится на такие равные отрезки длительностью τ , при котором каждому значению метеовеличины на одном отрезке найдется равное или близкое ему значение через τ единиц времени в следующем отрезке:

$$t_1 \approx t_{\tau+1}; t_2 \approx t_{\tau+2}; t_3 \approx t_{\tau+3} \dots t_{\tau} \approx t_{2\tau} \text{ и т.д.}$$

Графически серию непериодических вынужденных возмущений среды можно представить рис. 6.5.

На рис. 6.5 схематично показано изменение вынуждающей периодической функции с периодом 40 условных единиц на шкале времени. За один период 40 единиц происходит серия из семи собственных непериодических возмущений среды. Все возмущения различной амплитуды и длительности. Между ними нет зависимости. Однако во втором периоде в интервале с 41 по 70 единицу времени вся череда возмущений повторяется в той же последовательности, как в первом периоде. Аналогичные повторения показаны в третьем периоде.

Известно, что во взаимодействии элементов климатической системы колебательные процессы бывают вынуждающие, вынужденные и собственные, которые тоже возникают под воздействием вынуждающих процессов, но имеют собственные частоты. Вынуждающие возмущения задают ритмы для серий возмущений вынужденных и собственных. Для простоты изложения далее не будем разделять вынужденные и собственные колебания системы, так как они различаются только частотами, но имеют общее происхождение.

На практике вынуждающие силы всегда не известны достоверно. По данным метеорологических наблюдений мы имеем только

серии вынужденных колебаний сложной формы. И по этим вынужденным колебаниям необходимо выделить период τ скрытых вынуждающих ритмозадающих колебаний. Если τ известно, тогда временной ряд температуры можно разбить на отрезки длительностью τ , где τ – период вынуждающих колебаний, как показано на рис. 6.6. То есть при известном τ ряд можно разбить на несколько отрезков так, что каждому члену ряда t_i найдется равный или близкий ему член $t_{i+\tau}$, где τ – период вынуждающих колебаний. До этого момента предлагаемый метод совпадает с подходом Шустера (см. выше), а далее предлагается метод для выделения системы ритмов.

Серия значений $t_1, t_2 \dots t_n$ метеорологической величины (температуры) может быть любой сложности – периодической или непериодической с переменными фазой и амплитудой. Период τ не известен, его приходится искать, перебирая все возможные значения, проверяя сходство возмущений в соседних отрезках временного ряда.

В общем случае работа начинается с поиска периода τ повторения серии непериодических возмущений метеорологических величин, которые являются следствием вынуждающих ритмов. Если найти период τ , через который серия непериодических колебаний повторяется, то вся сложная и «псевдослучайная» суммарная картина колебаний становится прогнозируемой далеко вперед (на τ , на 2τ и т.д.).

Но вынуждающие процессы в климатической системе и с учетом внешних факторов полиритмичны, поэтому возникла необходимость разработки метода выделения набора ритмов, ответственных за все последующие вынужденные возмущения, включая возмущения на собственных частотах каждой составляющей климатической системы. А экстраполяция ритмов и вынужденных возмущений составляет суть статистической модели климата, описанной в следующем разделе.

6.6. Статистическая модель климата на основе ритмов

Наблюдаемое глобальное потепление климата сопровождается неоднозначной реакцией в разных регионах Земли. Глобальное потепление сопровождается изменением общей циркуляции атмосферы, что приводит к перераспределению тепла и влаги и к изменению пространственно-временных особенностей климата.

В связи с потеплением климата последнего столетия выполнено и опубликовано много работ, в которых по большим атмосферно-океаническим моделям оцениваются возможные предстоящие состояния климата через 50, 100 и более лет. Эти модели дают оценки температуры и других метеорологических характеристик будущего на каждый год, месяц и даже день по всему земному шару, но это не прогноз на каждый год – это оценки тех тенденций метеорологических величин и их вероятного рассеяния, которые могут сформироваться при дальнейшем накоплении парниковых газов. По таким модельным данным можно оценивать только тренды и осредненные по некоторым пространственным и временным интервалам значения характеристик будущего климата.

Однако для человека межгодовые изменения и отклонения температуры от линии тренда в ближайшие 10–30 лет не менее важны, чем сам тренд в эти годы. Поэтому стоит задача получения более подробных оценок межгодовых изменений климата на одно-два ближайших десятилетия. В настоящей работе предложен подход для получения некоторых обобщенных прогностических оценок температуры воздуха погодично на период до 2025 года. Полноценный прогноз со столь большой заблаговременностью невозможен, но обобщенные оценки тенденций предстоящих естественных изменений климата могут быть получены на основе статистических методов анализа накопленных данных.

Статистическая модель климата включает метод выделения ритмов на основе представлений о периодической нестационарности и экстраполяцию ритмов с учетом полиритмичности климатической системы.

Пусть имеется временной ряд t длительностью N , не содержащий тренда. Тренд исключается заведомо, вычисленный по всему временному ряду. Для целей прогноза удобнее весь ряд t разбивать на n отрезков длительностью τ , начиная от конца ряда. После такого разбиения, соответственные по номерам элементы этих отрезков суммируются и осредняются для получения осредненного эталона. Если номером 1 обозначить последний элемент ряда t и увеличивать номер в направлении к началу ряда, то будут получены отрезки по следующим элементам ряда: от t_1 до t_τ , от $t_{\tau+1}$ до $t_{2\tau}$, от $t_{2\tau+1}$ до $t_{3\tau}$ и т.д. По отрезкам составляется матрица $t_{i,j}$, в которой строками являются вышеупомянутые отрезки, а столбцами – соответственные элементы этих отрезков временного ряда.

Средние значения по n -столбцам дают значения осредненного эталона длительностью τ .

$$T_j(\tau) = (1/n) \sum_{i=1}^n t_{i,j}(\tau), \quad (6.1)$$

где i принимает значения от 1 до n ;

j принимает значения от 1 до τ ;

n – число отрезков длительностью τ ;

τ – длительность интервала, охватывающего совокупность возмущений.

Как правило, ритмы в атмосфере прослеживаются 2–3 раза и далее размываются, поэтому n не должно быть больше 3. Тогда членами осредненного эталона будут:

$$T_1 = (t_1 + t_{\tau+1} + t_{2\tau+1})/3; \quad T_2 = (t_2 + t_{\tau+2} + t_{2\tau+2})/3; \quad T_3 = (t_3 + t_{\tau+3} + t_{2\tau+3})/3 \text{ и т.д.}$$

Температура воздуха может быть подвержена влиянию различных факторов с различными ритмами. Набор влияющих ритмов в каждой точке и каждом месяце непостоянный, поэтому первоначально списком задаются все возможные ритмы длительностью от 4 до $N/2$ лет. По каждому заданному периоду ритма вычисляются (по формуле 6.1) осредненные эталоны отрезков ряда метеовеличины t . Для простоты изложения далее методику будем описывать на примере трех периодов,

хотя в каждом конкретном случае их число может быть разным и значительно больше. Три осредненных эталона обозначим $T(\tau_1)$, $T(\tau_2)$ и $T(\tau_3)$. Выбранные эталоны используются для построения модельных рядов $T_k(\tau_1)$, $T_k(\tau_2)$ и $T_k(\tau_3)$, где k перебирает даты (перебирает элементы временного ряда T_k). Каждый модельный ряд составляется из периодического повторения эталона до достижения N членов (до достижения длительности исходного ряда). Последнее значение модельного ряда должно совпадать с концом эталона $T_1(\tau_1)$, $T_2(\tau_1)$... $T_{\tau_1}(\tau_1)$, $T_{\tau_1+1}(\tau_1)$, $T_{\tau_1+2}(\tau_1)$... и т.д. до конца временного интервала исходного ряда. Продление модельного ряда еще на один интервал τ_1 дает прогностические значения первого модельного ряда. Аналогично строятся второй и третий модельные ряды из эталонов при τ_2 и τ_3 . Если эталонов больше, то по всем эталонам строятся модельные ряды, чтобы не пропустить ни одной составляющей полезного прогностического сигнала. Пока все построенные модельные ряды являются экспериментальными, большая часть из них не соответствуют реально существующим ритмам в атмосфере, такие ряды необходимо отсеять. Это ключевой момент методики.

Отсеивание необоснованных ритмов и их модельных рядов производилось на основе оценивания дисперсионным анализом вклада каждого испытуемого модельного ряда в общую дисперсию ряда. Полезным признавался тот модельный ряд, который объясняет большую долю общей дисперсии исходного ряда, чем содержится в остатках после вычитания этого модельного ряда. Остальные экспериментальные модельные ряды отсеивались. Оставшиеся наиболее значимые модельные ряды использовались далее в построении прогноза. Ритмы, на которых они построены, являются ритмической характеристикой состояния атмосферы в предпрогнозный период на заданной станции.

Все члены каждого модельного ряда от первого до N моделируют историю временного ряда, а $N+1$ -й член модельного ряда является прогностическим значением для одной цикличности. Методом наименьших квадратов строится уравнение множественной регрессии

исходного ряда наблюдений от всех полезных модельных рядов $T'(\tau_1)$, $T'(\tau_2)$ и $T'(\tau_3)$:

$$T'_k = aT'_k(\tau_1) + bT'_k(\tau_2) + cT'_k(\tau_3) + d. \quad (6.2)$$

Уравнение описывает текущие и предстоящие изменения значений временного ряда.

По уравнению (6.2) вычисляется ряд, который моделирует исходный ряд t . За прогностическое значение временного ряда T_k на дату $k = N + 1$ принимается значение T'_k при $k = N + 1$. Если временной ряд имел дискретность значений один год, то прогноз при $k = N + 1$ будет с годовой заблаговременностью, при $k = N + 2$ прогноз будет с двухлетней заблаговременностью.

Рассмотрим искусственный пример. Построим ряд, как результат суммирования синусоид с периодами $\tau_1 = 8$, $\tau_2 = 3,5$, $\tau_3 = 2,5$. Графически он показан на рис. 6.7.

Так как периоды заданы не целочисленными значениями, то выделенными периодами оказались $\tau_1 = 8$, $\tau_2 = 7$, $\tau_3 = 5$. Период 7 охватывает двойной период 3,5, а период 5 охватывает двойной период 2,5. Эти периоды полностью описывают все возмущения. Продление эталонов на несколько точек по временной шкале в будущее и суммирование их с соответствующими весовыми коэффициентами дает прогностические значения. Мы получили наглядное доказательство того, что τ – это не период задающих колебаний, это период, охватывающий совокупность однотипных последовательных возмущений. Метод работает правильно и в этом случае.

Каждый прогноз строится на основе ритмов, выделенных для данной станции и месяца. Наборы ритмов складываются различные. Предварительный анализ показал, что в январе по станциям России преобладают ритмы 5, 13, 18, 35–37 лет, в декабре – 8, 11, 18 и 35–37 лет, в другие месяцы выделяется, как правило, до 5–6 ритмов в интервале 3–18 лет.

18-летний ритм имеет наибольшую повторяемость в январе, июле-августе, в сентябре-октябре и в декабре, иногда его сменяет такой же сильный ритм – 17 или 19 лет. В тех случаях, когда нет 17–19-летнего

ритма, появляется 16-летний ритм, в основном это бывает в первой половине года.

10–11-летний ритм по всем проявлениям соответствует 10–11-летнему циклу солнечной активности. Ритм 10–11 лет прослеживается только в холодное полугодие. Это хорошо известный факт, описанный в литературе: солнечно-атмосферные связи более устойчивы в холодное полугодие. Усиление повторяемости 11-летнего ритма в марте-апреле согласуется с известным фактом о том, что в эти месяцы, а также в октябре-ноябре складываются благоприятные условия взаимодействия геомагнитного поля с межпланетным магнитным полем, при которых облегчается вторжение солнечных корпускул в атмосферу Земли при усилении солнечной активности.

8–9-летний ритм по устойчивости подобен 18-летнему циклу, иногда (в июне и августе) 8–9-летний ритм заменяется 7-летним ритмом. Оба этих ритма совпадают с особенностями взаимодействий Земли с Луной.

Четырехлетний ритм иногда переходит в 3- или 5-летний ритм.

Общей особенностью ритмов является то, что внутри года они проявляются в возмущениях температуры, как правило, от одного до двух месяцев и затем исчезают до следующего появления в одноименном сезоне через несколько лет. Это явное доказательство работы сезонного фильтра, описанного в разделе 6.3.

Из перечисленных длительностей ритмов можно сделать поспешный вывод о том, что случайным образом выделяются любые ритмы в интервале 4–18 и более лет. На самом деле состояние климата каждого конкретного месяца года описывается некоторым ограниченным согласованным ансамблем ритмов, длительность каждого из которых может немного варьировать в разные годы. Всегда ансамбль ритмов не сильно отличается от набора 4–6, 8, 11, 18, 35 лет, происхождение которых предстоит изучать. Большое разнообразие ритмических волновых движений в атмосфере обусловлено влиянием сил различного происхождения.

6.7. Исследование статистической модели климата

По методике, описанной в разделе 6.5, проводился анализ существующих ритмов в атмосфере за последние 50–70 лет. Выявлено, что основанием для построения прогностических климатических оценок является наличие в атмосфере ритмов около 6, 8, 12, 16, 17–18 и 35–37 лет. Задача прогноза климата сводится к прогнозу совокупности многолетних ритмов.

Проводились экспериментальные прогнозы климата с заблаговременностью до 20 лет. Здесь словами «прогноз климата» названы для краткости и далее будут так называться прогностические оценки состояния климата, которые имеют прогностический смысл только при некоторых обобщениях по времени или по пространству.

На основе проведенных численных экспериментов установлено, что ритмы короче 6 лет не сохраняются 20 лет в неизменном виде, поэтому для поставленной задачи далее использовались только длительные ритмы (6 и более лет). Верхний предел длительности ритма – 18 лет – был определен экспериментально. Для его выделения необходимо не менее 36 лет фактических данных перед годом прогноза. Привлечение более длительных рядов оказалось не эффективным. За пределами интервала 30–35 лет происходит существенное изменение структуры климата и его ритмических закономерностей. Для их описания необходимы длительные ряды наблюдений.

Для оценки точности прогноза климата проводились численные эксперименты. В работе использовались среднемесячные значения температуры воздуха по 8000 станциям Северного полушария Земли. Распределение метеорологических станций на Земле и в архивах ВНИИГМИ-МЦД очень неравномерно по странам и континентам. Особой густотой отличаются США. По территории России использовались данные всех работающих станций в количестве около 1600 штук с рядами разной длительности, поэтому европейская и южная зоны азиатской части России также представлены с достаточной густотой. Чтобы немного уменьшить преобладание станций в небольших

регионах и получить более равномерное пространственное освещение метеорологической информацией, исходные данные со станций переводились в узлы географической сетки $2 \times 2^\circ$. Данные всех станций в каждом таком квадрате осреднялись с весами, обратно пропорциональными расстоянию до узла. Из всех узлов для работы взяты только те, в которых данные о температуре воздуха имеются с 1938 года или ранее. Таких узлов оказалось 1167 штук. На рис. 6.8 показана карта их распределения. Из рис. 6.8 видно, что средние широты представлены хорошо.

В высоких широтах наблюдений проводится меньше, а в низких широтах большая разреженность узлов с данными связана с отсутствием там длительных рядов наблюдений.

По данным в узлах сетки составлялись экспериментальные прогнозы среднемесячной температуры воздуха на 20 лет, следующих после некоторого заданного года с номером N . В прогностических расчетах использовались ряды данных, ограниченных годом с номером N включительно. Далее будем называть его предпрогноznым годом. Фактические данные за последующие годы с номерами от $N+1$ до $N+20$ использовались для сравнения с прогностическими значениями за те же от $N+1$ до $N+20$ годы (оценки прогнозов на независимом материале).

В каждом узле прогнозы составлялись по десять раз и каждый раз при новом заданном номере предпрогноznого года для накопления статистики оценок прогнозов при различной заблаговременности. В каждом следующем экспериментальном прогнозе номер предпрогноznого года увеличивался на единицу. Таким образом, по каждому узлу сетки было составлено по десять прогнозов на 20 лет. В первом случае последним предпрогноznым годом назначался 1975 год и прогнозы вычислялись на 1976–1995 гг., при этом заблаговременность прогнозов составляла от 1 до 20 лет. При составлении этих прогнозов использовались данные только по 1975 год включительно. Далее предпрогноznым годом назначался 1976 год и прогнозы вычислялись на 1977–1996 гг. по данным до 1976 года. И в этом случае заблаговременность новых прогнозов составляла от 1 до 20 лет. И так далее.

В последнем случае последним предпрогнозным годом назначался 1985 год, а прогнозы вычислялись на 1986–2005 гг. Каждый раз по прогностическим среднемесячным значениям вычислялись прогностические среднегодовые значения температуры в узлах. Таким образом получено 10 прогностических полей с заблаговременностью 1 год, столько же прогностических полей получено с заблаговременностью 2 года и т.д. до 20 лет. В результате в каждом узле накоплено по 10 прогностических оценок для каждой заданной заблаговременности прогноза. Для каждого узла на соответствующий год подобраны для сравнения фактические значения температуры из данных наблюдений. Ошибки прогнозов вычислялись как средняя и среднеквадратическая разность между прогнозом и фактическим значением температуры отдельно для каждой заданной заблаговременности, но обобщенные для всего Северного полушария. Эксперименты проводились по всем отобранным узлам (в количестве 1167), средние и среднеквадратические ошибки прогнозов получены по каждому прогностическому полю путем осреднения по всем узлам и по всем десяти вариантам прогнозов одной заблаговременности. Таким образом, каждая оценка ошибки прогнозов получена была более чем по 10 000 случаям и является надежной. По всему полушарию получено двадцать обобщенных оценок качества прогнозов соответствующей заблаговременности.

На рис. 6.9 показаны средние и среднеквадратические ошибки прогнозов климата Северного полушария при заблаговременности от 1 до 20 лет. Оценки показали быстрое увеличение средней ошибки M (см. рис. 6.9) при увеличении заблаговременности прогноза. Усиливающийся систематический сдвиг является следствием несоответствия прогнозируемого тренда и фактических долгопериодных изменений (с периодами более 18 лет) климата. Метод прогноза на основе ритмов состоит из продолжения тренда на будущее и повторения набора выявленных ритмических составляющих в изменениях климата с вычисленными весами. Видимо, простое продление тренда на 20 лет вперед дает плохие результаты и портит весь прогноз.

Лучшие результаты получились в новом эксперименте, в котором из модели ритмов был исключен прогноз линейного тренда. Прогнозы составлялись по методу ритмов без предварительного выделения тренда в исходных данных и без прогноза трендовой составляющей. Заблаговременность прогноза также была от 1 до 20 лет. Новые оценки прогнозов изменения климата показаны на том же рис. 6.9. При всех вариантах заблаговременности прогнозов лучшие результаты по средним и среднеквадратическим ошибкам показывает метод ритмов без предварительного выделения трендов (далее – без трендов). Очевидно, для правильного выделения и прогноза тренда необходимы более длительные ряды данных наблюдений. Лучше не прогнозировать тренд совсем, чем прогнозировать его не совсем правильно.

Но и в этом методе (без трендов) средние и среднеквадратические ошибки медленно возрастают с увеличением заблаговременности прогнозов. Они всегда меньше, чем в методе с трендами, но также нарастают с увеличением заблаговременности. Средние ошибки в модели без трендов составляют от $+0,1$ до $-0,8$ °C и обусловлены преимущественно отрицательным систематическим сдвигом прогноза, который означает, что модель занижает потепление климата. Отсутствие тренда в модели прогноза является тому причиной, хотя простые методы экстраполяции тренда на 20 лет, как было показано ранее, дают еще менее точные прогнозы.

Более полную интегральную ошибку показывает среднеквадратическая оценка различий прогностических и фактических значений. Из рис. 6.9 видно, что среднеквадратическая ошибка в модели без трендов составляет от $1,2$ °C при малой заблаговременности и до $1,7$ °C при заблаговременности прогноза климата более 10 лет.

Значимость величины ошибки становится понятной при сравнении среднеквадратической ошибки с изменчивостью исходного ряда. Дисперсия каждого ряда среднегодовой температуры воздуха в узлах географической сетки вычислена за 1961–1990 гг., а обобщение по всем узлам выполнено путем осреднения всех дисперсий.

Среднеквадратическое отклонение, полученное из обобщенной дисперсии среднегодовых значений температуры, составило 2,0 °С. Аналогично получены обобщенные среднеквадратические отклонения температуры по каждому отдельному месяцу на основе рядов за 1961–1990 гг., составленных из погодичных значений по одноименным месяцам. Они приведены в табл. 6.1 и будут использованы в последующих оценках.

Таблица 6.1

Среднеквадратические отклонения S (°С) среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха за 1961–1990 гг., обобщенные по узлам географической сетки над сушей Северного полушария Земли

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
S	3,2	3,0	2,5	1,9	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,8	2,4	2,9	2,0

Из рис. 6.9 и табл. 6.1 видно, что при заблаговременности прогноза климата до 20 лет обобщенная среднеквадратическая ошибка (1,2–1,7 °С) меньше обобщенного среднеквадратического отклонения. Это является доказательством неслучайности прогноза климата по методу ритмов.

Таким образом, анализ ошибок прогнозов показывает, что использованный метод описывает основные черты регионального климата с заблаговременностью до 20 лет.

Традиционно прогноз климата выполняется по физико-математическим (атмосферно-океаническим) глобальным моделям климата, хотя известны их недостатки, ставящие под сомнение результаты, полученные на их основе. Но при отсутствии альтернативы модели широко используются для стратегических оценок изменения климата. В следующем разделе проводится сравнение точности прогнозов климата по физико-математическим моделям климата и по статистической модели ритмов, описанной в настоящей работе.

6.8. Сравнение ошибок статистической модели климата с ошибками обобщенной физико-математической модели

В разделе 6.3 приведены обобщенные оценки точности физико-математических моделей климата по станциям Земли. Сравним их с оценками точности прогнозов климата по методу ритмов. Оценки точности физико-математических моделей климата ранее (раздел 6.3) были получены осреднением за 1990–2005 гг. отдельно по каждому месяцу и в целом за год. Для сопоставления с ними новые оценки ошибок прогнозов по статистической модели ритмов также были получены по средним значениям за 1990–2005 гг. отдельно по каждому месяцу и в целом за год.

Прогнозы по статистической модели ритмов строились по данным до 1989 г. на 1990–2005 гг., заблаговременность прогнозов составляла от 1 до 16 лет. В узлах сетки по прогностическим и фактическим данным отдельно были получены средние за 1990–2005 гг. значения прогностической и фактической температуры. В каждом узле были вычислены разности между модельными и фактическими шестнадцатилетними средними значениями температуры воздуха по месяцам и по среднегодовым значениям. На основе полученных разностей по всем узлам далее были вычислены средние и среднеквадратические ошибки модели ритмов (MR), обобщенные по всем узлам Северного полушария Земли. Полученные оценки показаны в табл. 6.2–6.4 в сравнении с наилучшими результатами раздела 6.3 (модель SUM) глобальных атмосферно-океанических моделей климата Земли за тот же период.

Модель ритмов, как уже было показано, недостаточно точно прогнозирует тренд, поэтому средние ошибки ее показывают систематический сдвиг по всем станциям (табл. 6.4), но тем не менее эта модель дает лучшие оценки среднеквадратических ошибок модельных средних за 1990–2005 гг. Последнее означает, что на интервале 16 лет модель ритмов описывает пространственные особенности изменений климата лучше, чем это делают глобальные физико-математические

модели. Ошибки модели ритмов по всем месяцам и за год меньше естественной изменчивости (меньше соответствующих фактических среднеквадратических отклонений по месяцам и за год). А это означает, что модель не случайно описывает предстоящие изменения климата и согласуется с ранее полученными оценками. Ее недостатком остается плохое описание трендовой составляющей.

Далее описаны результаты построения и испытания новой модели климата, сочетающей преимущества статистической модели ритмов и физико-математических моделей климата.

Т а б л и ц а 6.2

Среднеквадратические ошибки модельных значений
средней температуры воздуха за 1990–2005 гг.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Модель климата SUM	3,5	3,3	3,1	3,1	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,9	3,2	2,4
Статистическая модель ритмов MR	2,0	2,3	1,5	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,0	1,3	1,2	1,2	1,2
S	3,2	3,0	2,5	1,9	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,8	2,4	2,9	2,0

Примечание. S – осредненное по всем станциям фактическое среднеквадратическое отклонение температуры.

Т а б л и ц а 6.3

Средние ошибки модельных значений средней температуры
воздуха за 1990–2005 гг.

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Модель климата SUM	-1,0	-2,0	-1,8	-1,9	-1,5	-0,8	-0,1	0,4	0,3	-0,1	0,2	-0,1	-0,1
Статистическая модель ритмов MR	-1,6	-1,9	-1,1	-0,8	-0,8	-0,6	-0,7	-0,8	-0,6	-0,7	-0,5	-0,5	-0,5

Т а б л и ц а 6.4

Ошибки прогноза многолетних среднесезонных температур
по модели ритмов. Осреднение за 1990–2005 гг.

	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Средние ошибки	-1,2	-1,1	-0,7	-0,6	-0,5
Среднеквадратические ошибки	1,6	1,4	1,1	1,0	1,2

6.9. Модель климата на основе совмещения физико-математической модели климата и статистической модели ритмов

В разделе 6.7 представлены оценки точности прогноза среднегодовой температуры воздуха с заблаговременностью до 20 лет. В описанном там варианте метода прогнозов на основе ритмов не удалось подобрать способ прогноза тренда. Отсутствие в статистической модели трендовой составляющей занижает прогностические значения.

Широко применяемые для прогностических оценок полные физико-математические модели имеют другие недостатки: они не описывают изменения климата на каждый конкретный год и дают только набор возможных значений межгодовых изменений температуры, не привязанных к конкретным годам. В результате при оценках точности прогнозов погодичных значений температуры по физико-математическим моделям возникают большие среднеквадратические ошибки. Большие неопределенности этих моделей ставят под сомнение их прогностические свойства, но за прошлые годы они удовлетворительно описывают трендовую составляющую.

Физико-математические модели климата описывают тенденции изменения температуры на несколько предстоящих десятилетий и даже столетий, но не дают правильного прогноза вариаций климата относительно общей тенденции. Кроме того, эти глобальные модели плохо описывают даже нормы региональных значений температуры,

часто модельные нормы имеют сдвиги, как результат недостаточно точного учета региональных особенностей климата.

Получается, что статистическая модель ритмов и физико-математическая модель климата имеют каждая не только свои недостатки, но и свои преимущества. Так как физико-математическая модель лучше описывает тенденции долговременных изменений, чем статистическая модель ритмов, а модель ритмов лучше описывает погодичный климат, то целесообразно построить новую модель климата на основе статистической модели ритмов, в которой межгодовые колебания будут описываться моделью ритмов без трендов, а долговременные тенденции (тренды) будут определяться по физико-математической объединенной модели SUM (см. раздел 6.3), предполагая, что в будущем многие неопределенности такой модели будут преодолены.

Для проверки такого подхода был доработан метод прогноза изменения климата на основе ритмов с заблаговременностью до 20 лет. Доработки заключались в привлечении обобщенной модели SUM (обобщенная модель на основе HadCM3, ECHAM4 и CGCM2) для вычисления трендов температуры в каждом узле.

В новом варианте короткопериодные изменения температуры прогнозировались так, как описано в разделе 6.6, но трендовая составляющая определялась в каждом узле по данным модели SUM (см. раздел 6.3). При этом во время привязки трендовой составляющей к ритмическим составляющим автоматически устранялся систематический сдвиг норм, который часто содержится в данных физико-математических моделей [86, 87]. В результате такой комбинации средние ошибки прогнозов уменьшились, систематический сдвиг стал не более $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6.10), а среднеквадратическая ошибка прогнозов с заблаговременностью до 5 лет составила около $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, с увеличением заблаговременности ошибка прогноза возрастает и при двадцатилетней заблаговременности составила около $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Построенная таким образом совмещенная модель климата на интервале с заблаговременностью прогноза до 20 лет оказалась лучше всех рассмотренных физико-математических моделей климата

и исходной статистической модели климата на основе ритмов. Поэтому в тех случаях, когда для практических задач достаточно прогноза климата на предстоящие 20 лет, целесообразно пользоваться предложенной совмещенной моделью. Но в тех случаях, когда необходим прогноз климата на более длительные сроки, пока нет альтернативы физико-математическим моделям.

6.10. Оценки ошибок прогноза погодичных колебаний климата Северного полушария

Приведенные в разделе 6.9 оценки точности прогнозов климата по модели ритмов с трендами SUM показали наилучшую точность из всех рассмотренных моделей. Указанные оценки были получены в среднем по десятилетиям по всему Северному полушарию. Но на практике необходимо иметь более детализированный по времени прогноз климата. В пределе необходимо знать ожидаемое состояние климата по годам. Невозможно сделать правильный прогноз климата по годам на каждой станции, но при большом пространственном осреднении, как показано далее, фоновый прогноз возможен.

В разделе 6.9 описаны прогнозы климата и оценки их точности по десятилетиям. Совершенно аналогично оценки точности были получены для погодичных прогнозов без обобщения по десятилетиям. На рис. 6.11 видно, что ошибки прогнозов температуры по отдельным годам больше ошибок прогнозов десятилетних средних значений температуры, представленных на рис. 6.10. Тем не менее они остаются меньше естественной изменчивости.

Из рис. 6.11 также видно, что наименьшие средние ошибки прогнозов достигаются при заблаговременности 1, 8, 12–13 и 16 лет. Это те удачные случаи, когда заблаговременность прогноза совпадает с длительностью ритмов, наиболее характерных для температурных рядов. В этом случае в статистической схеме прогноза ритмы

определяются легче и более правильно. В других случаях не всегда отбирается правильный набор ритмов, точность прогнозов понижается.

Среднеквадратическая ошибка возрастает с увеличением заблаговременности прогноза. До пятнадцатого года (рис. 6.11) ошибка всегда меньше $1,2^{\circ}\text{C}$ и, как правило, лежит в интервале $1,0\text{--}1,1^{\circ}\text{C}$. На двадцатый год среднеквадратическая ошибка составляет около $1,3^{\circ}\text{C}$. Ранее было показано, что естественная среднеквадратическая изменчивость среднегодовой температуры составляет 2°C . Это означает, что прогноз информативен.

Оценки точности погодичных прогнозов климата полушария показывают возможность составления обобщенных прогнозов климата с заблаговременностью до 20 лет с точностью, превышающей другие модели. При этом ошибки прогнозов остаются меньше естественной межгодовой изменчивости. Недостатком совмещенной модели является использование в них трендов из физико-математических моделей, которые, как следует из других глав настоящей монографии, пока очень несовершенны.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-05-00691).

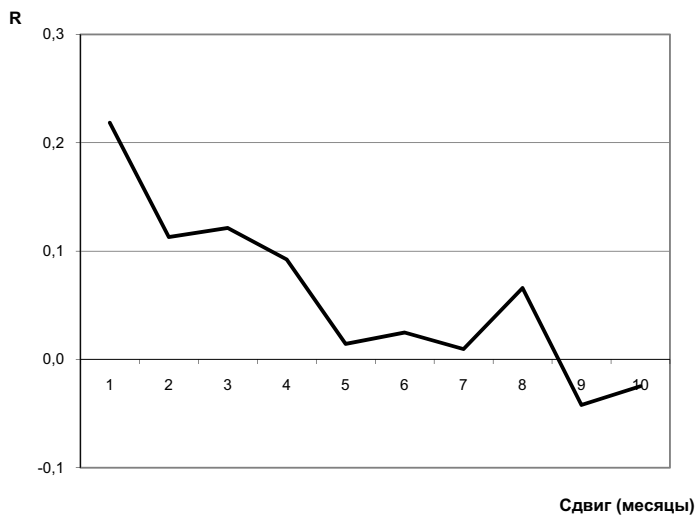


Рис. 6.1. Автокорреляционная функция месячных аномалий температуры в Москве с аномалиями последующих месяцев (сдвиг до 10 месяцев) за 1951–2000 гг.

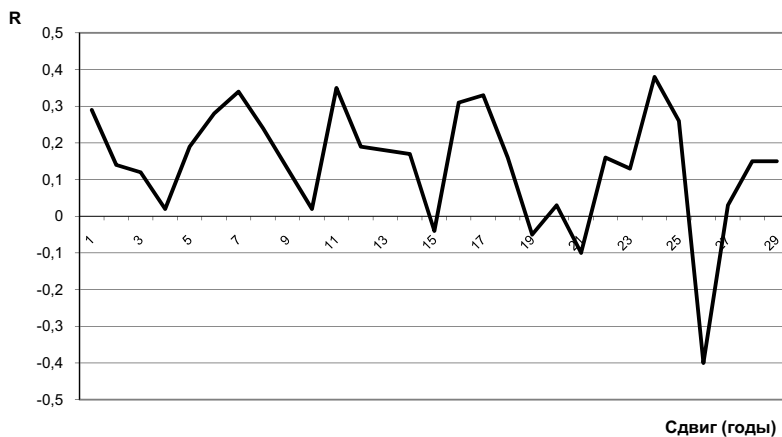


Рис. 6.2. Автокорреляционная функция (сдвиг до 29 лет) месячных аномалий погодичных значений мартовской температуры в Москве за 1951–2000 гг.

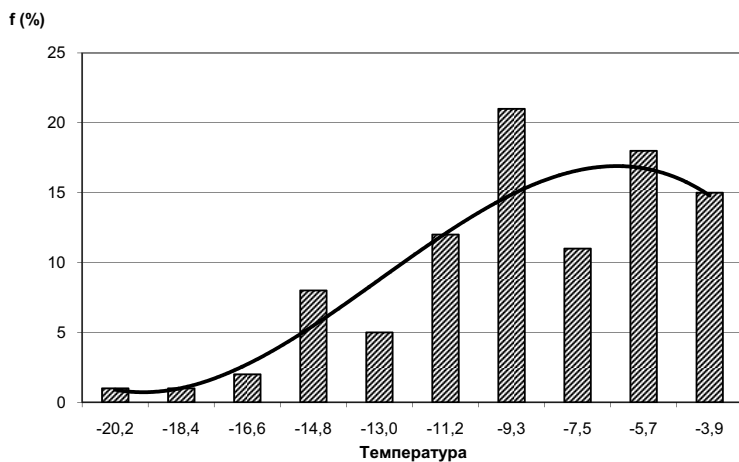


Рис. 6.3. Распределение среднемесячной температуры в Москве. Январь

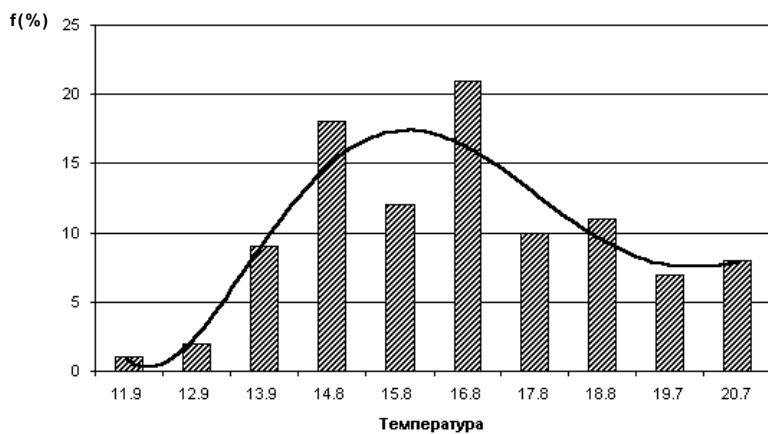


Рис. 6.4. Распределение среднемесячной температуры в Москве. Июль

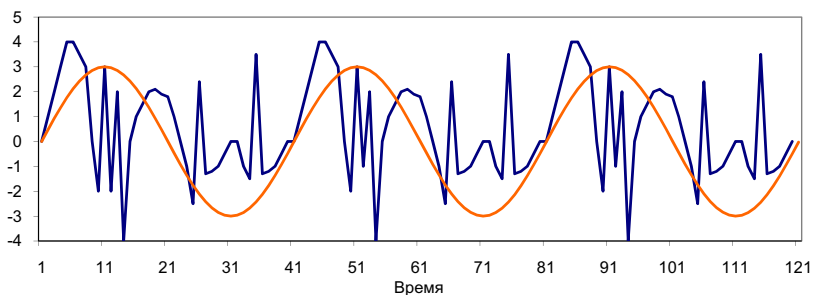


Рис. 6.5. Серия неперiodических возмущений среды под влиянием периодической функции

t_1	t_2	t_3	$\dots$	t_τ	$t_{1+\tau}$	$t_{2+\tau}$	$t_{3+\tau}$	$\dots$	$t_{2\tau}$	$t_{1+2\tau}$	$\dots$
Первый отрезок длительностью τ					Второй отрезок длительностью τ					Третий отрезок $\dots$	

Рис. 6.6. Временной ряд и деление его на отрезки с периодом вынуждающих колебаний τ

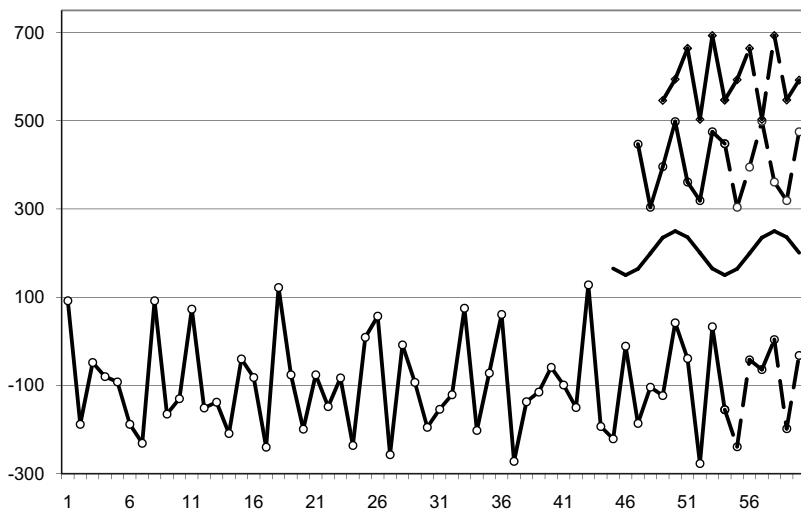


Рис. 6.7. Пример выделения из временного ряда эталонов ритмов

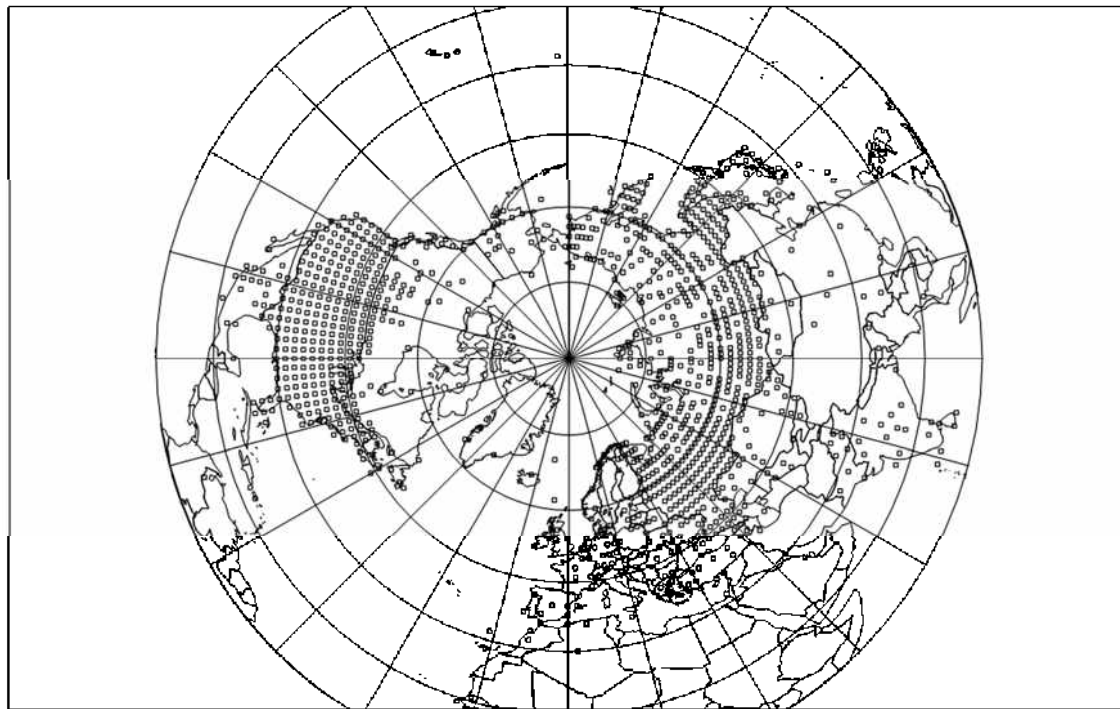


Рис. 6.8. Узлы, по которым вычислены оценки ошибок статистической модели климата

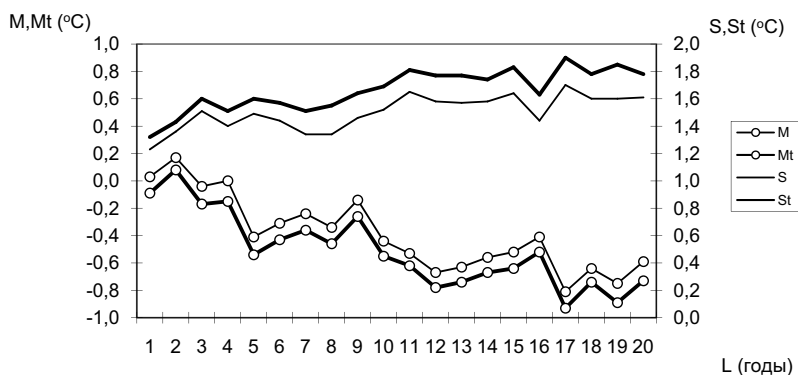


Рис. 6.9. Ошибка прогноза среднегодовых значений температуры при различной заблаговременности. Оценки по скользящим десятилетиям. Модель ритмов с трендами и без трендов: L – заблаговременность прогноза (годы); Mt и St – средняя и среднеквадратическая ошибка модели с трендами; M и S – средняя и среднеквадратическая ошибка модели без трендов

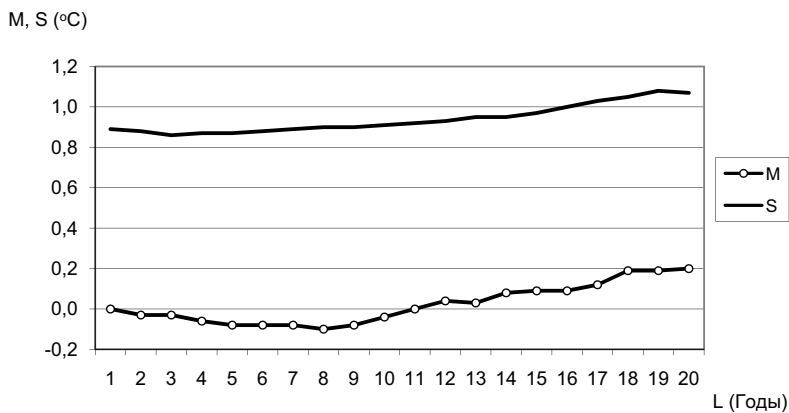


Рис. 6.10. Ошибка прогноза среднегодового значения температуры при различной заблаговременности прогнозов. Оценки по скользящим десятилетиям по Северному полушарию. Модель ритмов с трендами SUM: L – заблаговременность прогноза; M – средняя ошибка; S – среднеквадратическая ошибка

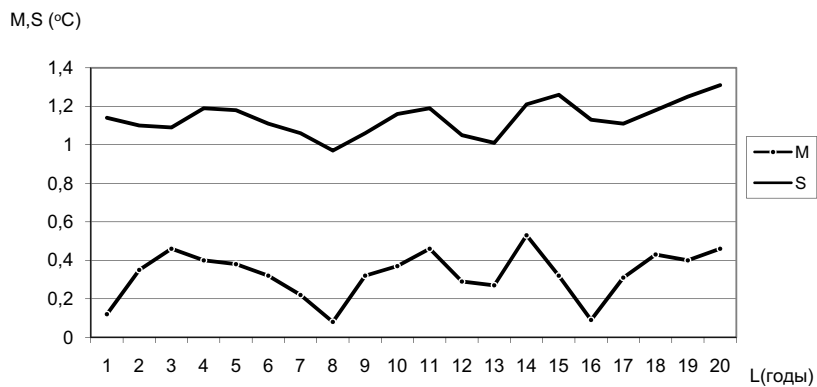


Рис. 6.11. Ошибки погодичного прогноза среднегодового значения температуры при различной заблаговременности прогнозов. Оценки по Северному полушарию. Модель ритмов с трендами SUM: L – заблаговременность прогноза; M – средняя ошибка; S – среднеквадратическая ошибка

Заключение

В монографии обобщены результаты исследований автора и материалы из научных публикаций российских и зарубежных ученых по актуальным проблемам современной климатологии.

На основе анализа публикаций и собственных представлений автора предложено решение ряда методических и терминологических проблем современной климатологии.

Так, например, за последние десятилетия несколько раз изменялись формулировки понятий «климат» и «изменения климата». В какой-то момент произошла подмена понятия «изменения климата» на «изменчивость климата» вопреки нормам русского языка. В монографии даны обоснованные определения понятий «изменения», «изменчивость» и «колебания климата».

Сформулированы различия в терминах «периодические», «циклические» и «ритмические возмущения» и важнейшие выводы по особенностям и различиям методических подходов при анализе каждого из указанных типов возмущений. Обращено внимание на то, что статистический анализ тогда дает результаты, когда метод анализа подбирается под конкретную физическую гипотезу с учетом свойств исследуемых процессов. Беспредметный эмпиризм или исследования статистической структуры метеорологических величин не приносят новых знаний о климатических процессах.

При выборе методов поиска связей между возмущениями во внешних факторах и внутренних характеристиках климатической системы предлагается учитывать, что вынуждающие колебания могут создавать вынужденные колебания с теми же периодами и могут запускать свободные колебания климатической системы с совершенно другими периодами. От выбора метода зависит успех статистических экспериментов, интерпретация и достоверность полученных результатов.

Обнаружен новый фактор изменений климата – переменная толщина верхнего перемешанного слоя океана, от которой зависит

теплосодержание, теплоемкость и инерционность слоя взаимодействия океана с атмосферой, а, следовательно, и теплообмен между двумя средами. Для определения аналога толщины слоя предложен простой индекс инерционности, который по многолетним данным хорошо согласуется с современными изменениями климата. Предполагается, что толщина слоя изменяется под влиянием глубинных процессов в океане и под влиянием внешних факторов через возмущения океанических течений и процессов вертикального перемешивания. Многолетние изменения индекса согласуются с изменениями скорости вращения Земли, солнечной активности и диссимметрии Солнечной системы.

Представлены доказательства влияния изменений склонения Луны на аномалии температуры и давления воздуха, при этом обнаружены резкие сезонные и широтные различия в величине лунного эффекта.

Приведены сведения о согласованных изменениях сезонных аномалий северо-южного ускорения движения Земли по орбите в течение года и сезонных аномалий температуры поверхности океана, а также аномалий температуры воздуха над континентами.

Сделан вывод о том, что длительные процессы в атмосфере формируются под действием внешних по отношению к атмосфере источников энергии. Поэтому вопрос о причинах изменений (колебаний) современного климата атмосферы сводится к вопросам о внешних факторах и о взаимодействии атмосферы с океаном.

Анализ эмпирических данных показывает, что усиление трендов температуры за период второго глобального потепления ориентировочно на 25 % вызвано повышением концентрации углекислого газа в атмосфере, а остальная часть приходится на долю естественных колебаний климата. Усиление парникового эффекта не является основной причиной современного глобального потепления. Гипотеза об антропогенном CO₂, как о внешнем факторе современного глобального потепления, справедлива лишь частично. Необходимы дополнительные исследования для поиска других факторов современных изменений климата.

Приведены оценки ошибок физико-математических моделей климата и делается вывод об их несовершенстве и непригодности на данном этапе для надежных прогнозов будущих изменений климата. Сведения о недостатках физико-математических моделей приведены не для того, чтобы признать их полностью ошибочными и бесперспективными, но для того, чтобы призвать к критической оценке результатов моделирования и продолжать совершенствование моделей.

Обращено внимание на сложившуюся методически тупиковую ситуацию, когда модели создают для оценки чувствительности климатической системы к наблюдаемым изменениям концентрации CO_2 , но при этом настраивают модели путем подбора чувствительности так, чтобы модель описывала реальные изменения климата. В результате такой работы модель получается неинформативной.

В условиях большой неопределенности в факторах изменений климата и в работоспособности существующих физико-математических моделей предложена авторская статистическая модель климата для прогноза изменений его состояния на период до 20 лет.

По аналогии с резонансной структурой строения Солнечной системы высказана гипотеза о резонансной структуре воздействия космических факторов на колебания отдельных элементов климатической системы. Наличие резонансного влияния внешних факторов на климатическую систему принципиально должно повлиять на выбор методов статистического анализа внешних связей климатической системы и на построение физико-математических моделей климата.

Далеко не все затронутые в монографии вопросы решены, но они поставлены и будут полезны для дальнейших исследований.

Список использованной литературы

1. Абдусаматов Х.И. О долговременных вариациях потока интегральной радиации и возможных изменениях температуры в ядре Солнца // Кинематика и физика небесных тел. 2005. Т. 21. С. 471.
2. Алехин Ю.М. Статистические прогнозы в геофизике. Доклад по диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Л.: ЛГМИ, 1965. 18 с.
3. Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Курс климатологии. Часть 1 и 2. Гидрометеиздат, 1952. 487 с.
4. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977. 446 с.
5. Астрономический ежегодник. Институт прикладной астрономии РАН. СПб. (ежегодные издания).
6. Богданов М.Б., Сурков А.Н. Короткопериодные изменения инсоляции, вызванные планетными возмущениями орбиты Земли // Метеорология и гидрология. 2006. № 1.
7. Борисенков Е.П., Семенов В.Г. О цикличности колебаний температуры воды Северной Атлантики // Изв. АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана». 1970. № 9. С. 965–970.
8. Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 470 с.
9. Бурлуцкий Р.Ф., Рафаилова Х.Х., Семенов В.Г., Храбров Ю.Б. Колебания общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 299 с.
10. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. О разнонаправленности изменений глобального климата на материках и океанах // Доклады Академии наук. 2005. Т. 400, № 1. С. 98–104.
11. Генихович Е.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. О комплексировании ансамбля климатических моделей // Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 28–46.
12. Генихович Е.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. О комплексировании ансамбля климатических моделей // Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 28–46.

13. Герасимов И.А., Мушаилов Б.Р., Копаев А.В. Динамическое воздействие больших планет на характеристики солнечного цикла // Труды конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века». СПб.: ИПА РАН, 2000. С. 265–266.
14. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. В 2 т. М.: Мир, 1986.
15. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 485 с.
16. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–66.
17. Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–14.
18. Дагаев М.М., Демин В.Г., Климишин И.А., Чаругин В.М. Астрономия. М.: Просвещение, 1983. 383 с.
19. Дзедзеевский Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат. М.: Наука, 1975. 285 с.
20. Доронин Ю.П. Тепловое взаимодействие атмосферы и гидросферы в Арктике. Л.: Гидрометеиздат, 1969.
21. Дроздов О.А. О методах анализа ритмичности природных процессов. Тезисы докладов к III совещанию «Ритмика природных явлений», Ленинград, 30 ноября 1976 г., Географическое общество СССР. Ленинград, 1976. С. 9–12.
22. Дроздов О.А. Основы климатологической обработки метеорологических наблюдений. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1956. 299 с.
23. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Б.П. Климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 567 с.
24. Дубов А.С., Малевский-Малевиц С.П., Карачев В.И. Об энергетическом балансе поверхности океана // Труды ДВНИГМИ. 1975. Вып. 56. С. 167–177.

25. Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Лыкосов В.Н. Климат и его изменения: математическая теория и численное моделирование // Сибирский журнал вычислительной математики. 2003. Том 6, № 4. С. 347–379.
26. Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Лыкосов В.Н. Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям // Метеорология и гидрология. 2004. № 4.
27. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И. Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. М.: Наука, 2005. С. 38–175.
28. Жуковский Е.Е., Киселева Т.Л., Мандельштам С.М. Статистический анализ случайных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 406 с.
29. Изменение климата. 2001 г. Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в подготовку Третьего доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р.Т. Уотсона. ВМО, ЮНЕП, 2001. 215 с.
30. Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 5–21.
31. Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н. Релаксационная теория оледенений в Северном полушарии. Потепление климата ускорит начало нового ледникового периода? // Биофизика. 1999. Т. 44, № 4. С. 750–761.
32. Кац А.Л. Необычайное лето 1972 года. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 58 с.
33. Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 270 с.
34. Кац А.Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 204 с.

35. Коваленко В.Д., Кизим Л.Д., Пашестюк А.М. Влияние изменчивости гравитационного поля Солнечной системы на климат Земли // Известия ВГО. 1991. Т. 123, вып. 4. С. 328–339.
36. Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л., 1965.
37. Кондратьев К.Я. Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 118–127.
38. Кононова Н.К. Потепление или колебания климата? // Экология и жизнь. 2011. № 11.
39. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии. М.: Едиториал УРСС, 2004. 544 с.
40. Котляков В.М. Наука – это жизнь. Избранные сочинения. Кн. 6. М., 2003.
41. Котляков В.М. Глобальные изменения климата: Антропогенные влияния или естественные вариации? // Экология и жизнь. 2001. № 1. С. 44–47.
42. Лаппо С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. 1984. С. 125–129.
43. Ларин И.К. Химия парникового эффекта // Химия и жизнь. 2001. № 7–8. С. 46–51.
44. Лившиц М.А. Физическая энциклопедия. В 5 т. / Главный редактор А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988.
45. Логинов В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2000. 495 с.
46. Логинов В.Ф. Оценка изменений климата Беларуси. Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды. Секция 3. Тезисы докладов. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1996. 74 с.
47. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 204 с.
48. Лосев К.С. Климат: вчера, сегодня... и завтра? Л.: Гидрометеиздат, 1985. 173 с.

49. Лосев К.С. Парадоксы борьбы с глобальным потеплением. Проблемы экологии // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79, № 1. С. 36–40.
50. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М., 1991. 400 с.
51. Макарова Е.А., Харитонов А.В. Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. М., 1972.
52. Максимов Е.В. Ритмичность природных явлений. Доклад на III-м совещании «Ритмика природных явлений». Ленинград: Географическое общество СССР, 1976. С. 5–8.
53. Максимов И.В., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Океан и космос. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 214 с.
54. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 308 с.
55. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. Ленинград: ГОНТИ, 1939. 19 с.
56. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 261 с.
57. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 247 с.
58. Монин А.С. Фундаментальные следствия взаимодействия атмосферы и океана // Изв. АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана». 1969. № 11. С. 1102–1113.
59. Монин А.С., Шишков Ю.А. Дилеммы потепления в XX веке // Человек и стихия. 1992. С. 47–50.
60. Монин А.С. История Земли. Ленинград: Наука, 1977. С. 228.
61. Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 269 с.
62. Мультановский Б.П. Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. Ч.1. М.: ЦУЕГМС, 1933. 180 с.
63. Мусаелян Ш.А., Угрюмов А.И., Задорожная Т.Н. Об асинхронных связях между аномалиями облачности над океаном и аномалиями

- температуры на континенте // Труды Гидрометцентра СССР. 1976. Вып. 177. С. 41–59.
64. Мушаилов Б.Р., Рыхлова Л.В. О динамическом воздействии больших планет на параметры солнечного цикла // Труды ГАИШ. 2002. Т. 70.
65. Оболенский В.Н. Основы метеорологии. ОГИЗ-Сельхозгис, 1933. 451 с.
66. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008.
67. Пагава С.Т. Синоптический метод месячных прогнозов погоды // Труды ЦИП. 1948. Вып. 5. С. 3–27.
68. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 614 с.
69. Пановский Г.А., Браер Г.В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 242 с.
70. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Казанский государственный университет, 2009. 503 с.
71. Перри А.Х., Уокер Дж. М. Система океан–атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 194 с.
72. Покровская Т.В. Синоптико-климатологические и геофизические долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 250 с.
73. Покровский О.М. Тренды температуры поверхности Мирового океана и приземного воздуха в прилежащих районах суши // Труды ГГО. 2009. Вып. 559. С. 7–31.
74. Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, 1977. 311 с.
75. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. Нью-Йорк: ООН, 1992. 30 с.
76. Семенов В.Г. Влияние Атлантического океана на режим температуры и осадков на ЕТС. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 148 с.

77. Семенов В.Г. К вопросу о влиянии подстилающей поверхности на циркуляцию атмосферы // Метеорология и гидрология. 1961. № 6. С. 46–49.
78. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 366 с.
79. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 380 с.
80. Сидоренков Н.С., Свиренко П.И., Шаповалова Н.С. Некоторые результаты использования данных о неравномерности вращения Земли для изучения атмосферных процессов // Труды ГМЦ СССР. 1984. № 230. С. 87–97.
81. Третье национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Межведомственная комиссия Российской Федерации по проблемам изменения климата. М., 2002. 123 с. www.unfccc.int.
82. Угрюмов А.И., Крутянская А.И., Просекина Г.М. Об учете температуры поверхности океана при составлении месячных прогнозов погоды по Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 1973. № 5. С. 28–34.
83. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
84. Шерстюков Б.Г. Аномалии температуры воздуха в северных широтах при различных условиях в космосе // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 4. С. 504–514.
85. Шерстюков Б.Г. Долгосрочный прогноз месячной и сезонной температуры воздуха с учетом периодической нестационарности // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 14–26.
86. Шерстюков Б.Г. Долгосрочный прогноз среднемесячной температуры воздуха на основе квазиритмов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2003. Вып. 171. С. 9–50.

87. Шерстюков Б.Г. Ошибки описания регионального климата атмосферно-океаническими моделями CGCM2, HadCM3 и ЕСНАМ4 на примере Московского региона // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 22–26.
88. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2008. 246 с.
89. Шерстюков Б.Г., Логинов В.Ф. Календарные особенности температуры в различных частях первого естественного синоптического района // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1977. Вып. 37.
90. Шмакин А.Б., Попова В.В. Влияние Северо-атлантического колебания на многолетний гидротермический режим Северной Евразии: II. Моделирование внутривековых колебаний теплового и водного баланса // Метеорология и гидрология. 2003. № 6. С. 59–68.
91. Birchfield E.G., Wang H., Rich J.J. // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99(C6). P. 12459–12470.
92. Broecker W.S. The great ocean conveyor // Oceanography. 1991. Vol. 4. P. 79–89.
93. Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D. Does the ocean atmosphere system have more than one stable mode of operation? // Nature. 1985. Vol. 315. P. 21–26.
94. Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B. and Jones P.D., 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. J. Geophysical Research 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548].
95. Climate Change 2001. The Scientific Basis / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. (Eds.) // Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, 2001. 881 p.
96. Climate Change 2007. The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change / S. Solomon, D. Quinn. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2007. 996 p.

97. Divine D.V., Dick C. Historical variability of sea ice edge position in the Nordic Seas // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. P. 1–14.
98. European Climate Assessment & Dataset <http://eca.knmi.nl/>.
99. FEDERAL CLIMATE COMPLEX GLOBAL SURFACE SUMMARY OF DAY DATA VERSION 7 (OVER 9000 WORLDWIDE STATIONS) <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>.
100. FRÖHLICH C. SOLAR IRRADIANCE VARIABILITY SINCE 1978. Revision of the PMOD Composite during Solar Cycle 21. Space Science Reviews 00: 1–13, 2006.
101. Gent P. R. Will the North Atlantic Ocean thermohaline circulation weaken during the 21st century? // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28, N 6. P. 1023–1026.
102. Global Historical Climatology Network-Monthly Dataset <https://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v3.php>.
103. Griffies S.M., Bryan K. A predictability study of simulated North Atlantic multidecadal variability // Clim. Dyn. 1997. Vol. 13, N 7–8. P. 459–587.
104. Gruza G., Rankova E., Razuvaev V., Bulygina O. Indicators of climate change for the Russian Federation // Climate Change. 1999. Vol. 42. P. 219–242.
105. Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. Surface air temperature and its variations over the last 150 years // Reviews of Geophysics. 1999. Vol. 37. P. 173–199.
106. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Locarnini R.A., Garcia H.E., Mishonov A.V. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems // GEOPHYS. RES. LETT. 2009. Vol. 36. 5 p.
<ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/data.nodc/woa/PUBLICATIONS/grlheat08.pdf>
107. Mazzearella A. The 60-year solar modulation of global air temperature: the Earth's rotation and atmospheric circulation connection // Theoretical and Applied Climatology. 2007. Vol. 88, N 3–4. P. 193–199.

108. Orssengo G. Predictions Of Global Mean Temperatures & IPCC Projections. April 2010.
<http://wattsupwiththat.files.wordpress.com/2010/04/predictions-of-gmt.pdf>
109. Phil Jones. Global Temperature Record.
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>.
110. Scafetta N. CLIMATE CHANGE AND ITS CAUSES. A Discussion About Some Key Issues. SPPI ORIGINAL PAPER. March 18, 2010.
http://scienceandpublicpolicy.org/images/stories/papers/originals/climate_change_cause.pdf
111. Sewart R.H. Introduction to physical oceanography. Texas A & M University. 2008. 345 p.
http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/content_s.html

Подписано к печати 25.12.2011. Формат 60×84/16.
Печать офсетная. Печ. л. 17. Тираж 250 экз. Заказ № 59.

Отпечатано в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», г. Обнинск, ул. Королева, 6