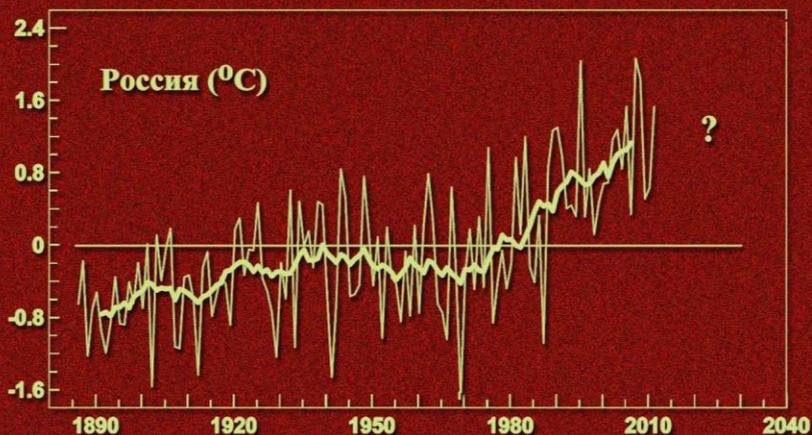


Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова

**НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ:
ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА**



Москва – 2012

ISBN 978-5-901579-35-0



FEDERAL SERVICE
FOR HYDROMETEOROLOGY AND
ENVIROMENTAL MONITORING

RUSSIAN ACADEMY
OF SCIENCES

INSTITUTE OF GLOBAL CLIMATE AND ECOLOGY

G.V. Gruza, E.Ya. Rankova

O B S E R V E D A N D E X P E C T E D
CLIMATE CHANGES OVER RUSSIA:
S U R F A C E A I R T E M P E R A T U R E

MOSCOW
2012

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова

**НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ:
Т Е М П Е Р А Т У Р А В О З Д У Х А**

МОСКВА
2012

УДК 551.524.3

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 194 с.

ISBN 978-5-901579-35-0

Приводятся результаты анализа состояния климата, его сезонных и географических особенностей и современных тенденций его изменения по данным наблюдений. Рассматриваются показатели изменчивости, аномальности и экстремальности климата. Предлагаются оценки ожидаемых изменений климата на ближайшие десятилетия на основе физико-статистических моделей с использованием данных наблюдений и доступных результатов моделирования.

The very recent results of empiric analysis of seasonal and geographical features of state of climate and its trends are presented. This includes characteristics of climate variability, climate anomaly and climate extremality. Climate change projections for near decades are given. They are based on the observational data and accessible model outputs.

ISBN 978-5-901579-35-0



© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» (ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН»), 2012.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
От авторов	9
1. Основные понятия и определения	10
1.1. Определение климата	10
1.2. Климатическая изменчивость	12
1.3. Изменения климата	13
2. Данные о температуре воздуха у поверхности земли	16
3. Анализ изменений и изменчивости приповерхностной температуры в пространстве и во времени	21
3.1. Современные климатические изменения приповерхностной температуры земного шара	22
3.2. Оценки изменений изменчивости климата над континентами Северного полушария в XX веке	31
3.3. Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата	33
4. Мониторинг температуры воздуха на территории Российской Федерации: методы и результаты	46
4.1. Мониторинг климата России: цели, задачи, практическая реализация	46
4.2. Метеорологические данные для мониторинга климата	48
4.3. Оценки климатических изменений температурного режима на территории Российской Федерации как задача оперативного монито- ринга климата России	61
5. Обновленные климатические данные о характеристиках температурно- го режима России (наблюдаемый климат)	73
5.1. Пространственные распределения многолетних средних и стан- дартных отклонений (1981–2010 гг.)	74
5.2. Тенденции современных изменений температуры приземного воздуха по данным наблюдений (1976–2011 гг.)	87
6. О возможном вкладе глобального потепления в формирование региональных климатических экстремумов	93
7. Динамические нормы и динамические аномалии температуры воздуха	101

7.1. Определения	102
7.2. Прогностическая ценность динамических норм для прогноза среднемесячной температуры воздуха	107
7.3. Оценка изменения повторяемости экстремальных аномалий в зависимости от изменения средних и дисперсий	113
8. Оценка предстоящих изменений климата статистическими методами	120
8.1. Оценка климатического отклика приповерхностной температуры воздуха на изменения концентрации двуокиси углерода и аэрозоля в атмосфере	120
8.2. Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата	123
9. Оценка предстоящих изменений климата с учетом роста концентрации парниковых газов и 60-летнего цикла	138
9.1. Основные причины изменений и изменчивости приземной температуры	140
9.2. Анализ откликов приповерхностной температуры в регионах земного шара на предполагаемые причины изменений	142
9.3. Оценка (прогноз) ожидаемых изменений квази-60-летней составляющей глобальной температуры	149
9.4. Суммарная оценка ожидаемых изменений среднегодовой глобальной температуры у поверхности земли	152
10. Анализ климата и изменений климата по данным наблюдений одной станции на примере о. Вайгач	156
10.1. Современный климат	160
10.2. Современные тенденции в изменении климата: температура приземного воздуха	167
10.3. Оценка предстоящих изменений климата	168
11. Анализ регионального климата и его изменений на примере российской части Алтае-Саянского экорегиона	171
11.1. Современный климат экорегиона	173
11.2. Современные изменения климата по данным наблюдений	178
11.3. Ожидаемые изменения климата	182
Заключение	186
Список литературы	187

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая читателю книга наших известных ученых – исследователей климата, заслуженных метеорологов Российской Федерации, д.ф.-м.н. Г. В. Груза и д.ф.-м.н. Э. Я. Раньковой – фундаментальный труд в области климатологии. В нем обобщены результаты научных исследований авторов, публиковавшиеся в периодической литературе и различных научных сборниках.

В этой книге, с одной стороны, подведен итог двадцатилетних исследований авторов в русле классической климатологии. Эти исследования основаны на фактических данных – на данных мониторинга климата – и посвящены всестороннему анализу температурного режима на территории России и его современным изменениям. В этой работе впервые дан столь масштабный анализ потоков данных о температуре воздуха в приповерхностном слое, получаемых в отечественной системе мониторинга климата – системе, которую в решающей степени обосновали, создали и поддерживают Г. В. Груза и Э. Я. Ранькова.

С другой стороны, эта книга открывает новую страницу в климатологии как в ее фундаментальных аспектах, так и в приложениях. Практически на протяжении первых трех четвертей XX века считалось, что современный климат не меняется. Поэтому для уточнения его характеристик – средних значений, дисперсий и других статистических параметров гидрометеорологических величин – нужно просто использовать все более длинные ряды наблюдений. На этом принципе, собственно, была построена идея и практика составления климатических справочников. Когда в последней четверти XX века – в начале XXI века выяснилось, что параметры климата – не константы, что они меняются, то потребовался пересмотр базовых понятий климатологии, в том числе понятий «норма» и «аномалия». В работе Г. В. Груза и Э. Я. Раньковой предложены и научно обоснованы новые понятия – «динамическая норма» и «динамическая аномалия», показана их эффективность в анализе данных мониторинга климата.

Среди множества новых идей, предложенных в книге, хотелось бы еще отметить физико-статистический метод прогноза климата на

ближайшие десятилетия. Он, несомненно, является весомым дополнением к математико-модельным методам, которые сегодня на слуху.

Существенная часть исследований, представленных в книге, выполнена в содружестве со специалистами из ведущих климатологических учреждений РАН – Института физики атмосферы им. А.М. Обухова, Института географии и Института вычислительной математики – и при поддержке РФФИ (под руководством авторов за это время выполнен ряд грантов по тематике монографии).

Книга предназначена для широкого круга метеорологов, климатологов и геофизиков, а также читателей, интересующихся состоянием и изменением климата на территории России.

Будем ожидать новых публикаций авторов о климатических изменениях других элементов климата, в том числе атмосферных осадков и циркуляции атмосферы.

С. М. Семенов

ОТ АВТОРОВ

Настоящая работа представляет собой попытку обобщить результаты исследований авторов по проблеме современных изменений климата, его аномальности и экстремальности и возможности их прогнозирования. Она не претендует на исчерпывающую полноту и детальность освещения затронутых вопросов и не является обзором состояния проблемы в целом.

Большая часть результатов получена в процессе выполнения планов научно-исследовательских работ Росгидромета, научных программ РАН, а также проектов РФФИ.

В работе над монографией и при проведении исследований авторы имели возможность взаимодействовать с широким кругом специалистов, которым искренне благодарны.

Прежде всего мы благодарим академика РАН Ю. А. Израэля за постоянную поддержку наших исследований в течение многих десятилетий, С. М. Семенова за сотрудничество и интерес к проблеме, Р. М. Вильфанда за полезные обсуждения результатов, В. Г. Блинова за поддержку идеи этой публикации.

Мы искренне благодарны РФФИ за многолетнюю поддержку наших исследований (гранты 96–05–64883, 97–05–65102, 99–05–64898, 00–05–64873, 02–05–64982, 03–05–64379, 05–05–65263, 07–05–13518, 08–05–00629, 09–05–13565, 11–05–00326).

Считаем своим приятным долгом поблагодарить коллег и коллег Л. К. Клещенко, Л. Н. Аристову, Э. В. Рочеву, М. Ю. Бардина, Т. В. Платову, О. Ф. Самохину и Ю. Ю. Соколова за многолетнее плодотворное сотрудничество, помощь, творческие споры и дружескую поддержку.

Особую благодарность выражаем В. Д. Казначеевой, Л. К. Клещенко, Э. В. Рочевой за помощь в редактировании рукописи и О. Н. Булыгиной за постоянное содействие в работе с данными наблюдений.

Ссылки на публикации авторов в тексте монографии даны в сокращенной форме (ГР, год издания).

Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Определение климата (ГР, 2003, 2004).

Физическое состояние атмосферы в заданной точке земного шара в заданный момент времени определяется как *погода*. Характеристиками состояния атмосферы являются: температура воздуха, давление, скорость ветра, влажность, осадки, солнечное сияние и облачность, а также такие явления, как туман, иней, град и другие *погодные переменные* (элементы погоды).

Климат определяется совокупностью состояний климатической системы в целом (глобальный климат) или ее части (климат региона, страны, города) за некоторый промежуток времени (климат XX века, климат XXI века, климаты прошлого). Оба эти аспекта – географический (область пространства) и исторический (период времени) – являются обязательными атрибутами конкретных климатологических приложений и исследований. Для описания климата используются статистические характеристики метеорологических величин и явлений – средние величины, экстремальные величины, повторяемость, продолжительность и интенсивность экстремальных явлений и др.

Такое определение климата позволяет использовать в качестве климатических переменных любые статистические характеристики любых параметров состояния климатической системы для определенной географической области и заданного интервала времени. Необходимо только точно указывать, какая характеристика рассматривается, для какой географической области и для какого интервала времени.

Полезно напомнить определения климата, сформулированные А.С. Мониним: «В наиболее лаконичном и общем виде такое определение можно высказать в семи словах: *распределение вероятностей на фазовом пространстве климатической системы*. Но чтобы оно было понятным не только людям в белых одеждах, но и всем людям в самых пестрых одеждах, эти слова необходимо детально расшифровать. Одним из шагов к расшифровке может стать следующая, более многословная, перефразировка нашего определения: климат – это статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой за достаточно длительные промежутки времени» (Монин, Берестов, 2005).

Есть еще и третья формулировка, вряд ли предназначенная для круга читателей настоящей статьи: «Климат – это нетривиальная инвариантная вероятностная мера, сосредоточенная на странном аттракторе климатической системы» (Монин, Сонечкин, 2005).

Второе из этих определений более всего соответствует нашему пониманию и практике использования термина «климат». Однако неясно, что значит «достаточно длительные промежутки времени». А понятия «ансамбль» и «аттрактор» относятся скорее к математической модели, чем к реальному объекту.

Таким образом, климат в широком смысле есть обобщение состояний погоды, и представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и повторяемостей явлений за выбранный период времени. Все эти дескриптивные статистики называются *климатическими переменными*. Наиболее важными и популярными климатическими переменными, часто используемыми как индикаторы состояния и изменения климата, являются температура воздуха у поверхности земли и атмосферные осадки.

В качестве стандартного (базового) периода для оценивания климатических переменных, характеризующих текущий или современный климат, по рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) используется период в 30 лет, в частности 1961–1990 гг. В настоящее время продолжают использовать данный период в качестве базового, и среднее именно этого периода по умолчанию называют «нормой», а отклонение от нормы – «аномалией», хотя в последние годы в связи с наблюдаемыми изменениями климата активно высказывается мнение о целесообразности приближения базового периода к текущему моменту.

В современных исследованиях термин «климат» используется также вместо термина «глобальный климат», который характеризуется набором состояний Глобальной климатической системы в течение заданного интервала времени. Глобальная климатическая система состоит из пяти основных компонентов: атмосферы, гидросферы, криосферы, поверхности континентов и биосферы, взаимодействие

которых существенно влияет на колебания погоды за длительные промежутки времени.

1.2. Климатическая изменчивость

Спектр изменений метеорологических и океанологических величин является непрерывным; как для большинства непериодических процессов, плотность его стремится к бесконечности лишь для периодических составляющих и их гармоник – годовой и суточной компонент. При этом вклад изменчивости, связанной с периодическими процессами, в общую дисперсию является конечным и может быть оценен для годового и суточного хода, если известны их амплитуды. Опираясь на классификацию А. С. Мони́на (2005), как на наиболее полную классификацию колебаний метеорологических и океанографических параметров в зависимости от их масштабов, мы приняли следующую практическую классификацию масштабов изменчивости характеристик климатической системы.

1. Микрометеорологическая изменчивость – от долей секунды до минут.

2. Мезометеорологическая изменчивость – от нескольких минут до часов.

3. Изменчивость, соответствующая синоптическим процессам, – от нескольких часов до двух-трех недель. Внутри этого интервала масштабов возможно индивидуальное прогнозирование и описание основных синоптических объектов, которые характеризуют погоду и ее изменения. За верхнюю границу интервала часто принимают масштаб предсказуемости индивидуальных синоптических процессов, который оценивается в две-три недели.

4. Климатическая изменчивость – от трех недель до нескольких десятилетий. Изменчивость этого масштаба, принятого нами за внутренний временной масштаб климатической системы, характеризует внутриклиматические колебания, или климатическую изменчивость, или флуктуации климата. Верхнюю границу масштаба климатической изменчивости во многих практических случаях целесообразно принять равной интервалу около трех десятилетий. В частности, интервал 30 лет принят ВМО за стандартный период для оценки «климатических норм» (с 1961 по 1990 г. в настоящее время).

Масштабы больше десятилетий характеризуют изменения климата. В этой области также целесообразно ввести дополнительные группы временных масштабов.

5. Межвековая изменчивость.

6. Изменчивость типа малого ледникового периода.

7. Изменчивость, соответствующая ледниковым периодам.

Как уже упоминалось, следует специально рассматривать периодические колебания, связанные с суточным периодом и периодом в один год, а также их гармониками.

В программе КЛИВАР (CLIVAR), являющейся основным компонентом Всемирной программы исследований климата, в качестве объекта исследований названа климатическая изменчивость, соответствующая следующим трем интервалам времени:

– от сезона до года (Seasonal to Interannual);

– от года до десятилетия (Annual to Decadal);

– от десятилетия до столетия (Decadal to Centennial).

Таким образом, изменчивость, соответствующая интервалу времени от трех недель (предел предсказуемости) до трех месяцев (сезон), традиционно представляющая собой объект долгосрочных прогнозов погоды или прогнозов короткопериодных колебаний климата, не включена в КЛИВАР. Нам представляется, что короткопериодные колебания климата от трех недель (одного месяца) до трех месяцев заслуживают специального рассмотрения.

Короткопериодные колебания климата (Short-term Climate Oscillations) играют важнейшую роль в формировании сезонных климатических аномалий в умеренных широтах. Здесь наибольший интерес представляют крупномасштабные изменения свойств западного переноса типа «цикл индекса» и «процессы блокирования».

1.3. Изменения климата

Изменения климата от одного периода к другому могут оцениваться как разность климатических переменных, характеризующих климаты конечного и начального периодов, или как тенденции изменений климатических переменных внутри всего рассматриваемого интервала времени. Следует подчеркнуть, что климат характеризует состояние реальной климатической системы. Соответственно,

обнаруженные изменения климата могут считаться реальными (соответствуют действительности), если их величина превосходит вероятную ошибку вычисления соответствующих климатических переменных.

В качестве *характеристики изменений климата* за определенный интервал времени используется коэффициент линейного тренда, оцененный методом наименьших квадратов. Он характеризует среднюю скорость изменений изучаемой гидрометеорологической величины на заданном интервале времени. В качестве *меры существования тренда* используется доля дисперсии переменной, объясняемая трендом. Она выражается в процентах от полной дисперсии за рассматриваемый интервал времени.

Статистическая значимость тренда оценивается *в рамках принятой стохастической модели климата (гипотезы)* с использованием 1%- или 5%-го уровня значимости. Иногда указывается критический уровень значимости, т.е. наименьший уровень значимости, при котором отвергается гипотеза об отсутствии тренда. Изменение климата считается статистически значимым, если оно превосходит заданный уровень значимости.

Как и климат, изменения климата могут оцениваться для заданной географической области или для земного шара в целом.

Изменение состояний климатической системы происходит под влиянием внутренней динамики и взаимодействия ее компонентов, а также внешних воздействий, таких, как извержения вулканов, изменения солнечного излучения и орбитальных параметров Земли, антропогенные возмущения. К последним относятся, например, изменения химического состава атмосферы в результате деятельности человека, изменения землепользования и т.п.

Таким образом, изменения климата могут быть следствием как естественных внутренних и внешних причин, так и следствием человеческой деятельности. В Статье 1 РКИК ООН «изменение климата» определяется более узко как «изменение климата, которое прямо или косвенно приписывается человеческой деятельности, меняющей состав глобальной атмосферы, и является добавкой к естественной климатической изменчивости для сравниваемых периодов времени». Тем самым РКИК ООН делает различие между

«изменениями климата», приписываемым человеческой деятельности, меняющей состав атмосферы, и «климатической изменчивостью», приписываемой влиянию естественных причин.

Мы примем данное выше более общее определение изменений климата, как это делается в научных исследованиях (и в частности в оценочных докладах МГЭИК) – безотносительно к вызвавшим их причинам. Следует иметь в виду при этом, что данные наблюдений позволяют оценивать только суммарные изменения климата вследствие как естественных, так и антропогенных причин.

Исследования современных изменений климата должны дать ответы на следующие вопросы:

- 1) какие изменения действительно происходят;
- 2) насколько хорошо мы понимаем прошлый и современный климат и наблюдаемые (выявленные по наблюдениям) изменения климата;
- 3) какие изменения климата предстоят в будущем.

Основным методом обнаружения изменений климата является статистический анализ *всех накопленных за исторический период данных наблюдений*. Ответить же на второй и третий вопросы – о том, каким причинам следует приписать обнаруженные изменения и какие изменения климата предстоят в будущем, – может помочь только исследование климатических процессов с помощью физико-математического моделирования глобального климата.

Таким образом, для научного анализа состояния климата, климатической изменчивости и изменений климата могут использоваться любые климатические переменные, для оценки отклонений от средних – любые базовые периоды (не только тридцатилетние), а для оценки изменений и изменчивости климата – все накопленные за исторический период данные наблюдений. Важно только в явном виде вводить точные определения и придерживаться их при описании результатов.

2. ДАННЫЕ О ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Глобальные данные. В настоящее время общепризнанными считаются три набора глобальных данных о температуре у поверхности земли. В их числе – данные Великобритании (<http://www.cru.uea.ac.uk>, Brohan et al., 2008), данные Национального климатического центра США (<http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm>; Smith et al., 2005) и данные Института космических исследований США (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp>; Hansen et al., 2001). На рис. 2.1 приведен ход приповерхностной температуры земного шара за период инструментальных наблюдений, рассчитанный по данным этих трех массивов. Данные Великобритании начинаются с 1850 года, данные США – с 1880 года. Сравнению указанных трех источников данных и соответствующих им оценок современных тенденций в изменении температуры посвящено множество работ (например, Hansen et al., 2010; Jones et al., 2012), в которых показано, что расхождения данных практически не влияют на результаты для крупных регионов и на глобальные закономерности и оценки тенденций. При этом расхождения рядов более заметны в XIX – начале XX столетий, когда существенно выше неопределенность оценок и шире доверительные интервалы. В частности, это видно и на рис. 2.1.

Первый архив глобальных полей сеточных данных (в 5-градусных «бюксах») за период инструментальных наблюдений был создан в отделе климатических исследований Университета Восточной Англии для аномалий температуры приземного воздуха над сушей (Jones, 1994). Позже совместно с Hadley-центром был создан массив, совмещающий данные об аномалиях температуры приземного воздуха над сушей с аномалиями температуры поверхности океанов и морей. В первых оценочных докладах МГЭИК эти массивы квалифицировались как наиболее соответствующие (по однородности и качеству наблюдений) требованиям, предъявляемым к данным для эмпирических исследований климата и обнаружения изменений климата.

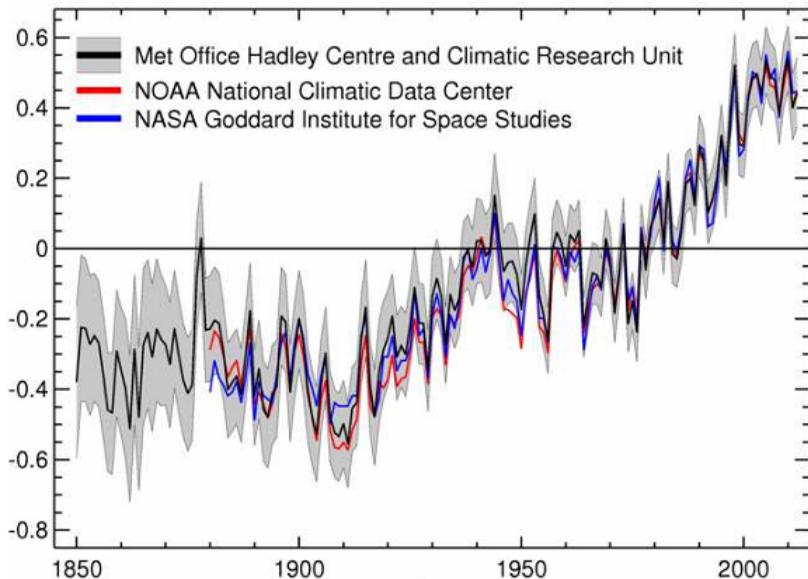


Рисунок 2.1 – Изменение среднегодовой глобально осредненной приповерхностной температуры по данным трех общепризнанных массивов данных (см. легенду). Цитируется по предварительному ежегодному заявлению ВМО о состоянии глобального климата (http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/documents/966_ru.pdf) от 28 ноября 2012 г.

Остановимся на данных Великобритании подробнее, так как они являются основным источником глобальных данных о приповерхностной температуре земного шара, использованных авторами при получении представленных результатов.

В настоящее время данные Великобритании поддерживаются совместно отделом климатических исследований Университета Восточной Англии и Hadley-центром (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/>). Это массивы сеточных данных глобального охвата CRUTEM3 и HadCRUT3, содержащие, соответственно, данные об аномалиях температуры приземного воздуха над континентами (Jones, 1999, 2012) и объединенные (blended) данные об аномалиях температуры воздуха над сушей и температуры воды на поверхности океанов (Brohan et al., 2006, 2011). Значения над сушей в этих массивах базируются на основном массиве стационарных наблюдений

Великобритании (Jones, 1994) и рассчитаны как средние из попавших в «боксы» станционных данных. Число «боксов» – 2592 (по 1296 в каждом полушарии), число всех использованных станций – более 2500, но после 1991 г. – всего лишь 800–1000. Значения на акваториях океанов получены осреднением данных о температуре поверхности океана (в «боксах» и за календарные месяцы каждого года), содержащихся в основном массиве судовых наблюдений Великобритании COADS (Folland, Parker, 1995).

Таким образом, различаются массивы CRUTEM (созданы CRU) и HadCRUT (созданы совместно CRU+Hadley Centre). Первые содержат только данные о температуре воздуха на высоте 2 м на континентах (surface air temperature), а вторые объединяют эти данные с данными о температуре поверхностного слоя воды на акваториях океанов и морей (sea surface temperature). Полученные таким образом объединенные данные (HadCRUT) упоминаются как «surface temperature» и часто переводятся как «приповерхностная температура» (как и в настоящей монографии).

Оба массива сеточных данных пополняются (и уточняются) в квазиреальном времени и доступны на интернет-сайте CRU <http://www.cru.uea.ac.uk/cru>. Здесь же доступны данные станционных наблюдений, которые были использованы при подготовке сеточных массивов. Очередная обновленная версия этих массивов (HadCRUT4, CRUTEM4) с данными по 2012 год должна стать доступна на этом сайте в 2013 году. Методика обработки данных в процессе создания массивов, оценки источников неоднородности и построения соответствующих доверительных интервалов подробно описаны в работе (Brohan et al., 2006; Jones et al., 2012), а также представлена на сайте (<http://hadobs.metoffice.com/hadcrut3/diagnostics/global/nh+sh/>).

Данные на территории России. Для исследования климата и изменений климата на территории России в настоящей работе использованы более подробные станционные данные метеорологических наблюдений, охватывающие при этом достаточно длительный период времени.

Метеорологические наблюдения в России начаты более 250 лет назад. Однако для надежных оценок изменений климата на территории западной части России имеются данные с начала 90-х гг.

XIX века, а на территории страны в целом – лишь с 1936–1939 гг. В настоящей работе анализ изменений климата на территории Российской Федерации выполнен по данным инструментальных наблюдений на 455 станциях России и соседних государств, из которых 310 станций расположены на территории России. Эти данные используются в оперативно действующей технологии мониторинга климата России, выполняемого НИУ Росгидромета (головной исполнитель ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН). Данные накоплены за период с 1886 года и поддерживаются в базе климатических данных ИГКЭ (см. <http://climatechange.su>). Более подробная информация приведена ниже, в разделе 4, при описании системы мониторинга климата.

Здесь укажем лишь, что весь комплект станционных наблюдений в базе данных мониторинга климата содержит данные 1383 станций глобальной сети о средней месячной температуре воздуха и месячных суммах осадков. Массивы были созданы в середине 1980-х гг., так что в состав станций были включены практически все станции мира, которые на тот момент функционировали (передавали телеграммы КЛИМАТ по сети глобальной телесвязи) и по которым были доступны данные, по крайней мере, с 1951 года. Наиболее длинные ряды в этом массиве содержат данные с 1886 года (хотя для отдельных станций имеются данные за более ранние годы). Верификация и контроль данных (включая статистический контроль с использованием связности наблюдений во времени и пространстве) выполнялись на всех этапах комплектации и пополнения массивов. Статистическая однородность рядов обеспечена введением корректирующих поправок, компенсирующих смену приборов и методов наблюдений, смену местоположения станций и др. Станции в пунктах с существенно возросшей численностью населения в массив не включены.

После принятия правительством в июле 1921 года «Декрета об организации метеорологической службы в РСФСР» началось планомерное развитие опорной сети станций: восстанавливались бездействующие длиннорядные станции, открывались новые станции в районах, не освещенных наблюдениями. В результате, основной массив наблюдений на станциях азиатской части страны начинается с середины 30-х гг. К 1936 г. количество действующих станций

(из выбранных 455) составило 338. Все 455 станций действовали с 1951 года до конца 80-х гг. В 1990-х гг. часть станций была закрыта. Данные станций смежных с Россией территорий (ННГ – новые независимые государства) также стали менее доступны в связи с необходимостью решений на межгосударственном уровне. Непрерывные наблюдения в течение всего столетия сохранились лишь на 156 станциях бывшего СССР, из которых большая часть расположены на Европейской территории страны.

В настоящее время в ИГКЭ производится тщательная инвентаризация и верификация данных наблюдений за последние 10–15 лет из всех доступных источников с тем, чтобы максимально уменьшить отмеченный эффект наблюдаемого в последние годы спада в работе сети наблюдений (по крайней мере, в рамках 1383 выбранных станций). Полезно также иметь в виду активную международную деятельность по подготовке и гомогенизации данных наблюдений улучшенного качества, пригодных для климатических исследований (Thorne et al., 2011).

3. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ И ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВО ВРЕМЕНИ

Факт глобального потепления в XX веке фиксируется в научной литературе с семидесятых годов столетия. С этого времени резко возросло количество исследований, посвященных проблеме изменений климата, как естественных, так и связанных с антропогенным влиянием. Становится очевидной необходимость непрерывного слежения за текущим состоянием климата.

В 1976 г. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) выпустила первое заявление об угрозе глобальному климату. В 1979 году, вслед за Первой Всемирной климатической конференцией, ВМО учредила Всемирную климатическую программу (ВКП), которая стала основой международной деятельности в области климата (ВКП, 1992). Деятельность ВКП направлена на улучшение мониторинга климатической системы и разработку методов для оценки влияния изменений климата. Гидрометслужбой СССР работа по регулярному мониторингу климата была организована с 1984 г. (Израэль, 1979; Груза и др., 1984; Винников и др., 1987; ГР, 1989).

Среди компонентов ВКП осуществляется Всемирная программа климатических данных и мониторинга (ВПКДМ), в задачи которой входит развитие климатологических сетей, развитие глобальной системы мониторинга, распространение информации об изменениях климата, развитие глобальных баз климатических данных и улучшение обмена глобальными данными. Одним из проектов ВПКДМ является проект «Мониторинг климатической системы (МКС)», тесно связанный с другими проектами Всемирной программы климатических данных и мониторинга: «Обнаружение изменений климата», «КЛИКОМ», «ИНФОКЛИМА». Всемирная информационно-справочная служба климатических данных ИНФОКЛИМА является глобальной службой сбора и распространения информации о наличии климатических данных. Проект МКС направлен на сбор, синтез, обобщение и распространение информации о значительных колебаниях или аномалиях глобальной климатической системы.

В 1992 г. принята «Рамочная конвенция по изменению климата» (РКИК) ООН.

Для научного обеспечения деятельности по РКИК усилиями ВМО/ЮНЕП была создана Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). В задачи МГЭИК входит наиболее полная и объективная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата и роли антропогенных факторов. В настоящее время МГЭИК подготовлены четыре научных отчета об изменении климата (IPCC, 1990, 1995, 2001, 2007) и готовится к выпуску пятый отчет AR5. В этих отчетах приводятся основные данные о наблюдаемом климате и его вариациях, моделях климата и степени соответствия результатов моделирования данным наблюдений.

В России первый «Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» (ОД, 2008) подготовлен Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в 2008 году; второй доклад (ОД2) должен быть опубликован в 2014 году.

3.1. Современные климатические изменения приповерхностной температуры земного шара

Современные изменения климата оцениваются в первую очередь по данным о наблюдаемой приповерхностной температуре. На территории континентов – это температура воздуха на высоте 2 м, на акваториях океанов – температура поверхностного слоя воды. Основным показателем глобального климата и глобальных изменений климата является глобальная, т. е. осредненная по всему земному шару приповерхностная температура. Пространственное осреднение выполняется обычно по значениям не самих температур, а их аномалий, т. е. отклонений от средних за выбранный базовый период, называемых также нормами.

Наблюдаемое в настоящее время изменение климата можно охарактеризовать как «продолжающееся глобальное потепление». Реальность современного глобального потепления подтверждается многими сопутствующими фактами. Главные из них – рост среднего (глобального) уровня океана, уменьшение площади снежного покрова на суше Северного полушария и сокращение морского льда в

Арктическом бассейне (IPCC, 2007). Интенсивность глобального потепления оказывается весьма значительной, и научное объяснение этого явления стало актуальной практической задачей для человечества, так как последствия ожидаемых изменений климата могут оказаться весьма серьезными.

На рис. 3.1 приведен ход температуры приземного воздуха, осредненной по территории России (по данным ИГКЭ) и над континентами Северного полушария (данные CRUTEM3, UK), а также ход глобально-осредненной приповерхностной температуры земного шара (данные HadCRUT3, UK).

Можно видеть, что глобальное потепление в XX веке было не вполне однородным. Выделяются три интервала: потепление 1910 – 1945 гг., слабое похолодание 1946 – 1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 года. Эти изменения были обнаружены также и в России (Рубинштейн, Полозова, 1966; Груза, Абдумаликова, 1966; Бudyко, Винников, 1976; Груза и др., 1977; Груза, Ранькова, 1980). Отметим, что первое потепление, получившее название «потепление Арктики», сразу же было замечено российскими учеными – уместно вспомнить активное освоение Северного морского пути, знаменитую зимовку папанинцев, эпопею челюскинцев.

Территория России существенно более чувствительна к воздействиям на климат, чем Северное полушарие и земной шар в целом. Действительно, размах аномалий среднегодовых температур Российской Федерации на рис. 3.1 достигает 3–4 °С, в то время как в среднем для земного шара и суши Северного полушария он лишь несколько превосходит 1,0–1,5 °С. (более подробная характеристика климата России и его изменений в XX столетии приводится в разделе 4).

Самым теплым для территории России оказался 2007 год, когда среднегодовая температура превысила климатическую норму 1961–1990 гг. на +2,10 °С – значение, максимальное за период с 1886 года. Предыдущие максимумы зафиксированы в 1995 и 2008 гг., когда превышения нормы составили 2,07 °С и 1,85 °С, соответственно. В среднем для суши Северного полушария самым теплым был также 2007 год (аномалия +1,04 °С), за ним – с минимальным различием 2010 и 1998 гг., а далее – все годы начавшегося XXI столетия. Для Земного шара самым теплым оказался 1998 год (аномалия +0,55 °С),

второе–третье место разделили 2005 и 2010 гг. с аномалией $+0,48\text{ }^{\circ}\text{C}$ (разница между ними в пределах точности оценок) и девять из следующих 10 максимумов – все из XXI столетия.

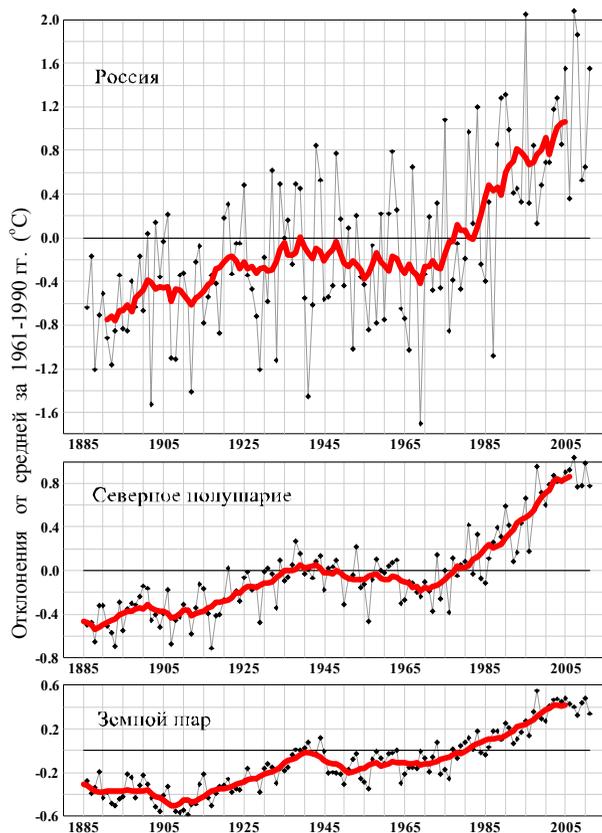


Рисунок. 3.1 – Изменение среднегодовой аномалии температуры у поверхности, осредненной по Земному шару (данные HadCRUT3), над континентами Северного полушария (данные CRUTEM3) и по территории России (данные ИГКЭ), в течение 1886–2011 гг.

Основным средством исследования закономерностей формирования климата и его изменений являются физико-математические модели. Для осуществления моделирования климата с помощью таких моделей требуется самая мощная вычислительная техника. Необходимо также данные об изменении естественных (солнечное излучение,

вулканы и др.) и антропогенных (эмиссии парниковых газов при сжигании органического топлива, выбросы озонобразующих веществ, землепользование и др.) факторов. В настоящее время для моделирования климата в ведущих метеорологических центрах мира используются, в соответствии с международными научными программами, два-три десятка наиболее продвинутых моделей. Одна из таких моделей создана в Институте вычислительной математики РАН под руководством академика В.П. Дымникова. Некоторые результаты моделирования климата, полученные с помощью этой модели Е. М. Володиным (Дианский, Володин, 2002), использованы в настоящей работе.

Результаты моделирования климата XIX–XX вв. используются для оценки качества воспроизведения моделями реального наблюдаемого климата (этот вопрос рассматривается ниже), а также для оценки роли различных факторов в изменении климата (данные о факторах вводятся в модель по результатам наблюдений).

В (IPCC, 2007) описаны многочисленные сопоставления результатов моделирования изменений приповерхностной температуры в XX веке как с учетом всех факторов формирования климата, естественных и антропогенных, так и с исключением фактора антропогенного роста концентрации парниковых газов. Эти сопоставления, выполненные для крупных регионов земного шара, показали, что без учета антропогенного фактора невозможно объяснить повсеместный рост температуры, наблюдаемый во второй половине XX века. Важнейшим антропогенным фактором оказался рост концентрации углекислого газа в результате сжигания органического топлива (Forster et al., 2007); на втором месте, хотя и с меньшим вкладом, – изменения в землепользовании. Напомним, что глобальная концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась в XX веке с 280 ppm в доиндустриальную эпоху до 379 ppm в 2005 году (ppm – число частей на миллион, промилле), притом что диапазон значений этой величины в последние 650 тысяч лет составил 180–300 ppm (установлен по кернам льда). Годовые темпы роста концентрации углекислого газа за 1995–2005 гг. составили 1,9 ppm/год, в сравнении с 1,4 ppm/год в целом за период непрерывных прямых атмосферных измерений 1960–2005 гг. Пример такого эксперимента см. на рис. 3.2.

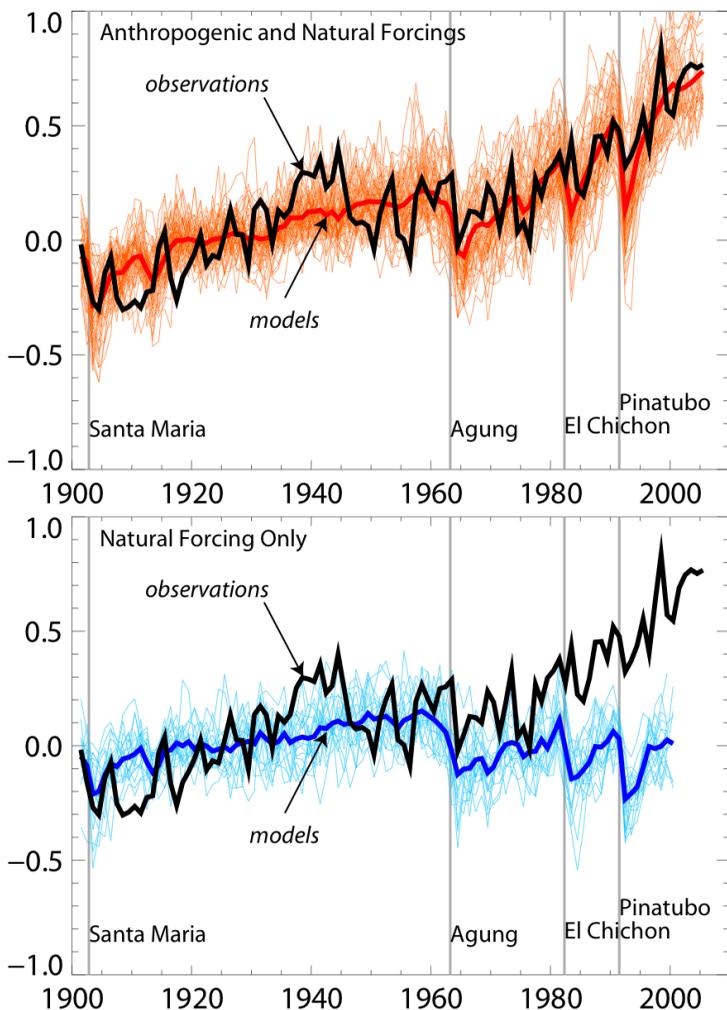


Рисунок 3.2 – Аномалии (отн. 1901–1950 гг.) средней глобальной температуры приземного воздуха по данным наблюдений (черная жирная кривая) и результатам моделирования (цветные жирные кривые – мультимодельные средние; тонкие линии – отдельные прогоны):

а) 58 прогонов по 14 моделям с учетом антропогенных и естественных факторов; б) 19 прогонов по 5 моделям с учетом только естественных факторов (IPCC, 2007)

На рис. 3.2 показаны временные ряды (с 1900 г.) глобально-осредненных температур: наблюдавшихся и «модельных», причем «модельные» ряды представлены как по данным индивидуальных моделирований (тонкие линии), так и осредненных по мультимодельному ансамблю (жирные кривые). Вертикальные линии на рисунке указывают годы крупных извержений вулканов. Моделирования, завершившиеся раньше 2005 года, продлены до 2005 года по нескольким первым годам эксперимента SRES A1B.

Рисунок четко иллюстрирует основной вывод: потепление климата, по крайней мере в последние 30–40 лет, в значительной степени обусловлено увеличением концентрации парниковых газов (в первую очередь диоксида углерода) вследствие антропогенного воздействия – сжигания органического топлива. Однако часть наблюдаемых региональных климатических изменений может быть результатом локальных антропогенных изменений (урбанизация и рост мегаполисов), эффект которых еще предстоит оценить. Также четко видно, что *модели практически не воспроизводят ни потепление 1910–1945 гг., ни слабое похолодание 1946–1975 гг.* Причины этого, более раннего, потепления и сменившего его похолодания требуют, таким образом, дополнительного объяснения. По этой причине в настоящей работе (как это принято в докладах IPCC) особое внимание уделяется анализу трендов за период с 1976 года, в большей мере характеризующих антропогенное влияние на современный климат.

Примерно с 2000 года наступила некоторая пауза в глобальном потеплении: глобальная температура колеблется на уровне достигнутых высоких значений. В результате, хотя десятилетие 2001–2010 гг. в целом остается самым теплым за весь период инструментальных наблюдений, внутри него монотонного потепления не наблюдается. В табл. 3.1 для этого периода приведена динамика коэффициентов тренда, которые характеризуют изменение средней скорости потепления за период с 1976 года для всех трех рассматриваемых рядов. Соответственно, оценки для земного шара получены по массиву HadCRUT3 (для суши – температура воздуха, для океанов – температура воды), а для Северного полушария и России – по массиву CRUTEM3 и станционным данным (только для суши).

Таблица 3.1

**Оценки линейных трендов
пространственно-осредненных температур
для Земного шара (ЗШ), Северного полушария (СП)
и территории России: b – коэффициент линейного
тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет), $D\%$ – доля дисперсии,
объясняемая трендом**

Период	ЗШ (суша+море)		СП (суша)		Россия	
	b	$D\%$	b	$D\%$	b	$D\%$
1976–2002	0,18	67,7	0,33	63,8	0,47	26,0
1976–2003	0,19	70,8	0,34	66,6	0,48	29,4
1976–2004	0,19	73,2	0,34	68,9	0,46	29,8
1976–2005	0,19	75,4	0,34	71,3	0,49	34,1
1976–2006	0,19	76,4	0,34	73,5	0,44	29,8
1976–2007	0,18	76,7	0,35	75,8	0,49	35,4
1976–2008	0,17	74,8	0,34	75,6	0,51	39,7
1976–2009	0,17	75,8	0,33	75,4	0,47	35,9
1976–2010	0,17	77,1	0,32	76,9	0,43	33,5
1976–2011	0,16	75,1	0,31	76,3	0,44	36,2

Временные ряды на рис. 3.2 и соответствующие оценки трендов в табл. 3.1 действительно указывают на определенное замедление глобального потепления, что вызвало активную дискуссию научной и околонучной общественности. Появились многочисленные заявления о прекращении глобального потепления и даже о начале глобального похолодания. В частности, большая дискуссия развернулась на сайте газеты Mail Online после статьи *David Rose «Global warming stopped 16 years ago»* от 13 октября 2012 г. (см. рис. 3.3). В центре этой дискуссии – противоположная интерпретация наблюдаемого факта учеными-климатологами *Phil Jones* (MetOffice, Университет Восточной Англии) и *Judith Curry* (Технический университет Джорджии в Америке).

Проф. Дж. Карри считает, что климатические модели при всей их сложности пока не совершенны и что в течение последних двух десятилетий естественная изменчивость (влияние таких факторов, как долгопериодные циклы температуры в океанах и солнечная радиация) доминирует над эффектом парникового потепления. По мнению Дж. Карри, сложившееся понимание причин современного потепления

(с 1980 г.) и прогнозы предстоящих изменений климата требуют пересмотра в пользу внутренней естественной изменчивости как фундаментально важного фактора.

Проф. Фил Джоунз, однако, считает, что 15-летнего периода недостаточно для подобных утверждений и что нынешнее десятилетие, по его мнению, по-прежнему будет самым теплым за период инструментальных наблюдений. Подробное освещение этой дискуссии можно найти на сайте <http://www.dailymail.co.uk/> и на сайте Met Office.

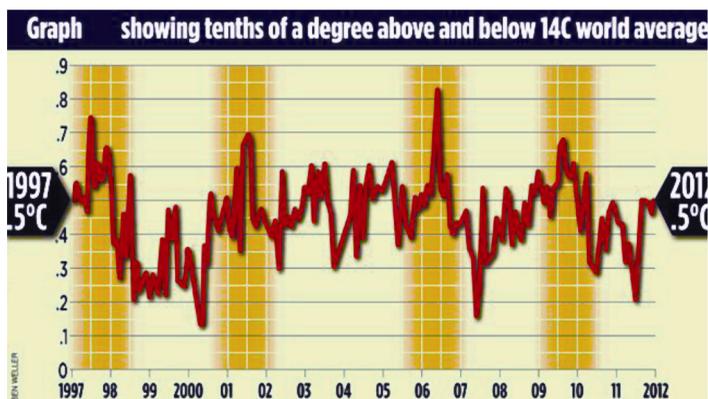


Рисунок 3.3 – К вопросу о 16-летнем «плато» в «глобальном потеплении» (цитируется по статье David Rose «Global warming stopped 16 years ago ...» в газете Mail Online от 13.10.2012 г., <http://www.dailymail.co.uk/>)

Представляет интерес позиция ведущих специалистов NASA (Институт космических исследований США) по данному вопросу, сформулированная в работе (Hansen et al., 2012): «Целесообразно прокомментировать ожидаемые в ближайшем будущем изменения климата, особенно потому, что кажется вероятным (судя по наблюдениям) некоторое ослабление солнечной радиации в течение последнего солнечного цикла. Если солнечная радиация была доминирующим механизмом изменения климата, во что верит большинство противников глобального потепления, то можно ожидать тенденции к глобальному похолоданию. Однако продолжающийся планетарный дисбаланс энергии и быстрое увеличение эмиссии CO₂ от использования ископаемого топлива указывают, что глобальное потепление будет

продолжаться на масштабах 10-летий. Кроме того, в соответствии с нашим пониманием роли естественной изменчивости в изменении температуры прошлого 10-летия, глобальная температура должна значительно повыситься за следующие несколько лет, так как тропики неизбежно приближаются к следующей фазе Эль-Ниньо».

Еще более определенная формулировка дана в ежегодном предварительном заявлении ВМО о состоянии климата в 2012 г.: «Естественная изменчивость климата, обусловленная такими явлениями, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья, оказывает влияние на величину температуры и атмосферных осадков (от сезонных до годовых). Однако они не изменяют основную долгосрочную тенденцию повышения температур вследствие антропогенного изменения климата» (пресс-релиз ВМО № 966 от 28 ноября 2012 г.).

Следует помнить, однако, что эти мнения пока следует рассматривать как дискуссионные. Интересующемуся читателю можно дополнительно предложить рис. 3.4, на котором показаны все 15-летние тренды за период наблюдений и на их фоне выделено всего пять периодов (красные отрезки): обсуждаемый период 1997–2011 гг. и четыре ближайших к нему по значению тренда. По-видимому, можно согласиться, что дальнейшее развитие процесса такой 15-летней паузой еще не определяется.

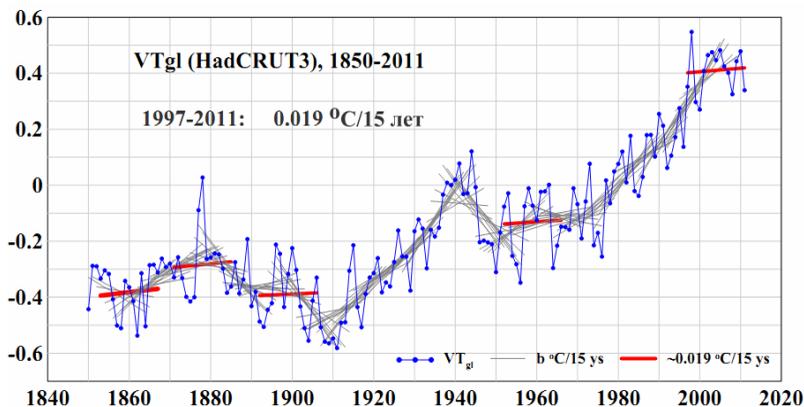


Рисунок 3.4 – Изменение среднегодовой глобально-осредненной приповерхностной температуры VTgl с 1850 по 2011 г. Серые отрезки – скользящие 15-летние линейные тренды с шагом один год. Красными отрезками выделены: тренд последнего 15-летия 1997–2011 гг. и по два ближайших к нему по величине (выше и ниже)

3.2. Оценки изменений изменчивости климата над континентами Северного полушария в XX веке

Для количественной оценки величины климатической изменчивости предложены характеристики (меры) изменчивости и способы их вычисления (ГР, 1998, 2003). Оценки предложенных характеристик климатической изменчивости были рассчитаны и проанализированы по данным о температуре приземного воздуха над Северным полушарием.

В качестве меры изменчивости (рассеяния) обычно используются средние квадратические (или средние абсолютные) отклонения от среднего значения. Для нестационарных процессов предполагается, что суммарная изменчивость распадается на изменчивость, объясняемую трендом среднего, и остаточную изменчивость, связанную с отклонениями от тренда. Последняя оценивается как среднее квадратическое или среднее абсолютное значение отклонений от тренда. Если же предположить, что уровень величин отклонений от тренда также подвержен медленным изменениям, то соответствующий тренд изменчивости естественно определить как тренд абсолютных величин или квадратов отклонений от тренда средних. В настоящей работе мы рассматриваем именно тренд абсолютных отклонений от тренда средних величин как тренд изменчивости.

Сравнение выполнено для Северного полушария по данным двух массивов средних месячных температур воздуха: данные 1 383 станций в базе данных ИГКЭ и данные в 5-градусных «боксах» массива CRU (Jones, 1999). Тренд изменчивости оценивался на каждой станции для двух периодов (1901–1998 и 1951–1998 гг.) и трех «сезонов»: календарный год, теплое и холодное полугодия. Использовались лишь станции с достаточно полными рядами (если пропуски в наблюдениях не превышали 10 % лет). Для оценки тренда средней температуры воздуха на каждой станции использовались 4 модели: 1 – регрессия на время (обычный линейный тренд); 2 – регрессия на среднюю концентрацию двуокиси углерода; 3 – регрессия на среднюю глобальную температуру; 4 – отфильтрованный ряд, содержащий колебания с периодами более 10 лет. Для всех четырех моделей в качестве тренда изменчивости оценивался

линейный тренд величин абсолютных отклонений от тренда средних. Таким образом, для каждой станции получен набор коэффициентов АУ, АС, АГ и АМ (соответственно, для моделей 1–4). Результаты представлены на 24 картах Северного полушария: 4 модели × 2 периода × 3 временных масштаба (здесь не приводятся). Выводы из анализа сводятся в основном к следующему.

Модели АУ, АС, АГ дают сходные результаты. Обнаружено, что в целом за 100-летний период (1901–1998 гг.) в холодный сезон года изменчивость увеличивается почти по всей Евразии и в центральных районах США. В теплый период рост изменчивости характерен лишь для центральных районов Евразии и южных районов США. В Европе, в северных районах США, в Японии изменчивость существенно уменьшилась.

В то же время во второй половине столетия (1951–1998 гг.) тренды указывают на увеличение изменчивости на территории Евразии в зоне 40–60° с.ш., в Японии, в восточных районах США и в Канаде. Существенное ослабление изменчивости обнаруживается в основном в холодный период в отдельных районах России и в восточных и западных районах Канады. Несколько иначе выглядят оценки изменчивости АМ: увеличение изменчивости во все сезоны обнаруживается лишь в восточных районах США. В холодный период на большей части рассматриваемой территории отмечается уменьшение изменчивости. В Европе распределение оценок изменчивости в пространстве довольно неоднородно.

Таким образом, характеристики изменчивости годовых аномалий температуры воздуха подвержены изменениям на масштабах 10–100 лет. Отмечается увеличение изменчивости климата в Евразии в зоне 40–60° с. ш., на востоке США и в Японии, особенно заметное в период 1951–1998 гг. Можно отметить также устойчивость результатов: даже для низких оценок знак тенденций (увеличение изменений изменчивости) одинаков в разных вариантах эксперимента, независимо от используемого архива и метода оценки. Из моделей устойчивость результатов выше для модели АГ.

3.3. Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата

Сезонные изменения приповерхностной температуры являются важной составляющей климатической изменчивости температурных условий. В настоящей работе представлены некоторые количественные характеристики сезонной изменчивости, представляющие существенный интерес для исследования изменений климата.

В работе (Семенов и др., 2008) проанализировано географическое распределение отклика среднегодовых температур в разных точках земной поверхности на повышение среднегодовой глобальной температуры на один градус. В настоящей работе исследуются некоторые сезонные особенности проявления сигнала глобального потепления в России и на земном шаре в целом (оценки для среднегодовых температур также будут приведены). Сделана также попытка оценки отклика региональных сезонных температур на синхронные изменения глобальной приповерхностной температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в продолжение Груза и др., 2008).

3.3.1. Сезонный ход глобальной приповерхностной температуры

Сезонный ход норм пространственно-осредненной приповерхностной температуры приведен на рис. 3.5 для земного шара в целом и для обоих полушарий. Оценки получены по данным массива «abstem3» Университета Восточной Англии (доступен на сервере <ftp://ftp.cru.uea.ac.uk/>), содержащего оценки климатических норм за 1961–1990 гг. по глобальной сетке 5-градусных «боксов». Массив «abstem3» был получен с использованием всех доступных регулярных наземных наблюдений и дополнительных источников, в том числе благодаря контактам с национальными и локальными службами.

Отмечается некоторая асимметрия в сезонном ходе для Южного полушария – зимний минимум температуры смещен к августу (хоть и незначительно). Размах годового хода температуры существенно выше в Северном полушарии, где он составляет около $13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Многолетняя средняя месячная температура меняется здесь от $7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в январе до $\sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в июле. Аналогичные оценки составляют для Южного полушария $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (интервал от $10,6$ до $16,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) и для земного шара – около $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (интервал от $12,1$ до $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

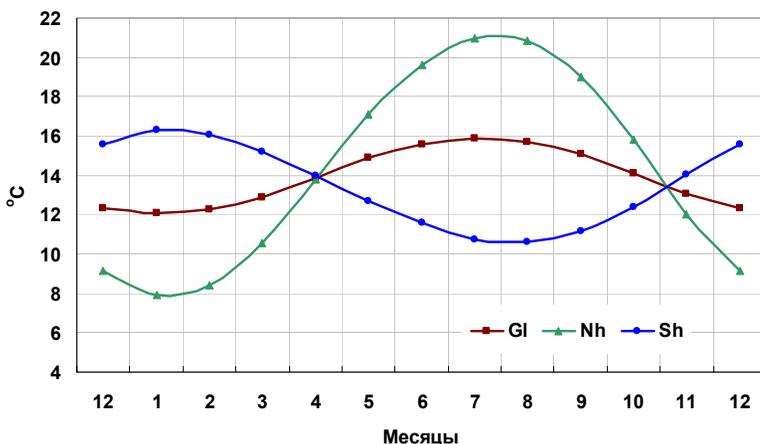


Рисунок 3.5 – Сезонный ход норм пространственно-осредненной приповерхностной температуры для земного шара в целом (GI), Северного (Nh) и Южного (Sh) полушарий. Оценки получены по данным Университета Восточной Англии (<ftp://ftp.cru.uea.ac.uk/>)

Существенно отметить доминирующую роль Северного полушария в сезонном ходе приповерхностной температуры земного шара, а также тот факт, что амплитуда сезонного хода температуры на порядок превосходит величину ее изменения за 100 лет.

3.3.2. Географические и сезонные особенности отклика региональных приповерхностных температур на изменение глобальной температуры

Ниже рассматриваются оценки чувствительности региональных температур к изменению глобальной температуры, полученные статистически в результате совместного анализа рядов аномалий глобальной температуры (<http://www.cru.uea.ac.uk>) и температур, осредненных по пространственным пятиградусным «боксам» (Jones et al., 1999). В каждой такой паре рядов первый (глобальная температура) – переменная X (фактор, регрессор), а второй (температура очередного «бокса») – переменная Y (зависимая переменная). В качестве оценки чувствительности для каждого «бокса» принимается значение коэффициента регрессии $b_{YX} = r_{YX} (\sigma_Y / \sigma_X)$, где r_{YX} – коэффициент корреляции, а σ_X , σ_Y – стандартные отклонения

соответствующих переменных. Оценки чувствительности, таким образом, позволяют оценить среднее изменение региональной температуры ΔT_{reg} в ответ на заданное изменение глобальной температуры $\Delta T_{reg} = b_{Y/X} \Delta T_{gl}$, причем коэффициент регрессии $b_{Y/X}$ указывает изменение региональной температуры ΔT_{reg} , соответствующее изменению глобальной температуры (фактора) на 1°C , т.е. $\Delta T_{gl} = 1^\circ\text{C}$.

В качестве переменной X целесообразно использовать среднюю приповерхностную глобальную температуру для каждого рассматриваемого месяца (сезона), или годового отрезка, к середине которого относится изучаемый месяц, или календарного года. В настоящей работе для примера выбран последний вариант.

Географическое распределение отклика сезонной локальной приповерхностной температуры на изменение глобальной температуры на 1°C приведено на рис. 3.6 по глобальной сетке 5-градусных «боксов» для января, июля и для года в целом. На рис. 3.7 приведены предельные оценки этих откликов (процентиль 97,5). Пустыми оставлены «боксы», не обеспеченные данными (освещенность ниже 50 %). Из приведенных оценок следует, что отклик январских температур более интенсивный, чем годовых и июльских.

Наиболее интенсивный положительный отклик зимой имеет место в северных районах Северной Америки и Евразии, слабый отрицательный отклик наблюдается в районе Гренландии, Гольфстрима, Атлантического побережья Антарктиды, Чукотки. В июле положительный отклик значительно более слабый, а отрицательные отклики пренебрежимо малы.

Предельные оценки откликов (процентиль 97,5) среднегодовой, январской и июльской температур (рис. 3.7) значительно интенсивнее и практически всюду положительны, кроме слабого отрицательного отклика в январе в районе Гольфстрима.

Следует отметить, что отклики, оцененные за столетний период (1909–2008 гг.), скорее всего, непостоянны во времени, и в будущем авторы предполагают выполнить более детальный анализ.

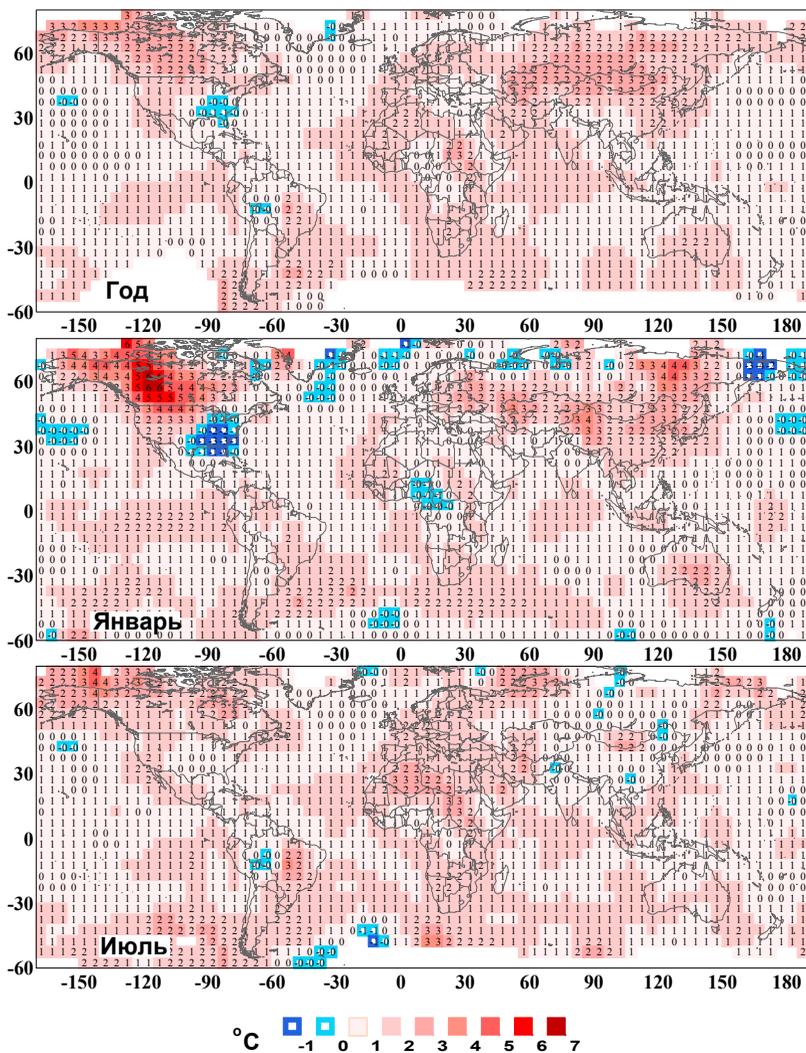


Рисунок 3.6 – Оценки ожидаемых изменений среднегодовой, январской и июльской температур у поверхности земного шара (в 5-градусных «боксах») при повышении среднегодовой глобальной температуры на 1 °С (по данным массива *HadCRUT3* за 1909–2008 гг.)

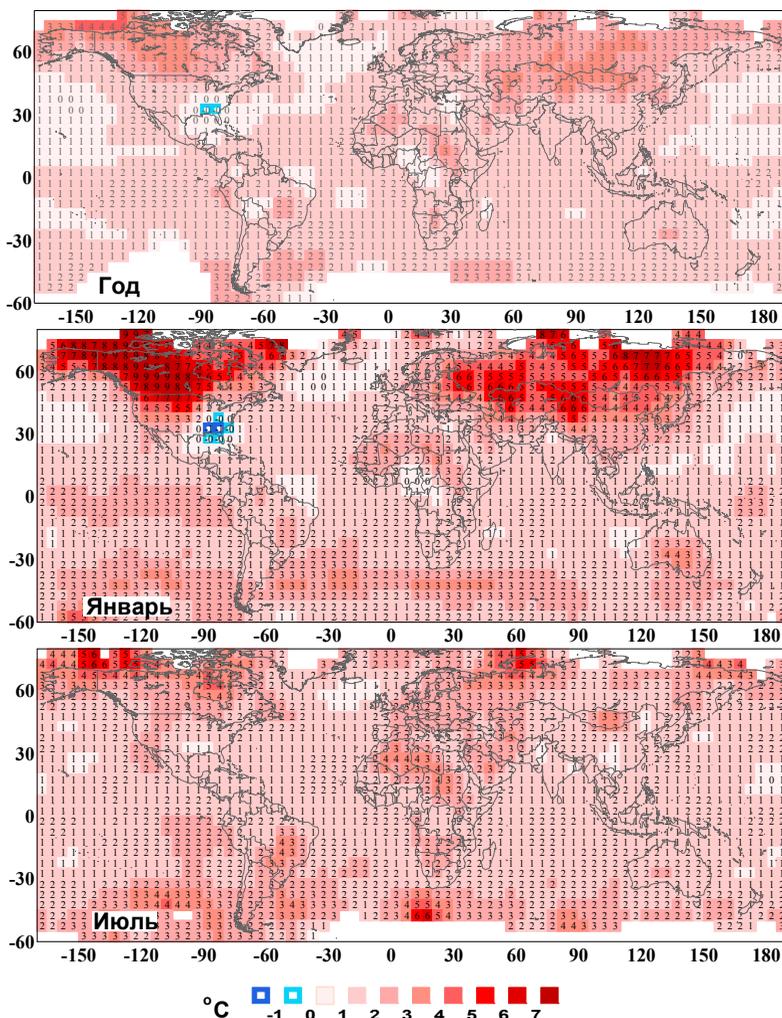


Рисунок 3.7 – Предельные оценки (процентиль 97,5) изменений среднегодовой, январской и июльской температур у поверхности земного шара (в 5-градусных «боксах») при повышении среднегодовой глобальной температуры на 1 °C (по данным массива *HadCRUT3* за 1909–2008 гг.)

Остановимся несколько подробнее на оценках, полученных для территории России. С этой целью рассмотрим несколько 5-градусных «боксов», расположенных в трех широтных поясах: 75–70, 65–60 и 55–50° с.ш. в разных регионах России (рис. 3.8). Цветом выделены физико-географические регионы, используемые в оперативном мониторинге климата России. Нумерация «боксов» соответствует их широтному (первая цифра) и долготному (вторая цифра) положению.

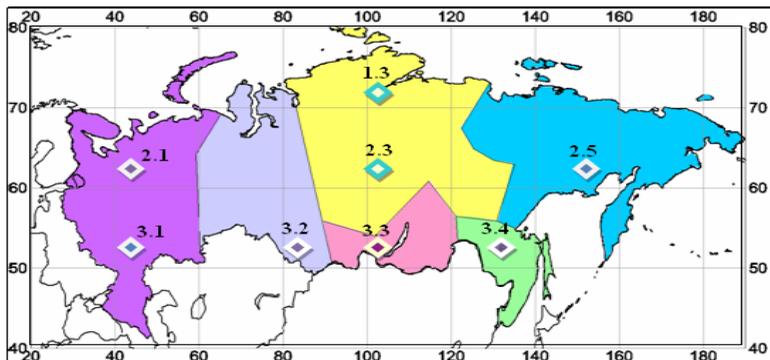


Рисунок 3.8 – Физико-географические регионы России. Ромбами указано положение центров рассматриваемых 5-градусных «боксов»

На рис. 3.9 показан сезонный ход оценок чувствительности температуры избранных «боксов» к глобальному потеплению. На рисунке приведены две оценки: b – собственно отклик на глобальное потепление в 1°C и D – доля дисперсии региональных температур, объясняемая глобальным потеплением (в процентах). Естественно предположить, что оставшаяся изменчивость связана с колебаниями синоптического масштаба. На рисунках слева объединены кривые для «боксов» вдоль северных широт, справа – вдоль южной широты.

Главный результат заключается в наличии существенного сезонного хода локальной чувствительности приземной температуры к глобальному потеплению – зимой чувствительность выше, чем летом. В северных широтах выделяется единственный регион (под номером 2.3 – центр Средней Сибири), в котором отмечается сильный эффект потепления, но только в зимний период года (январь–март). Для остальных «боксов» объясненная дисперсия во все месяцы не

превышает 10%. Отклик на глобальное потепление в южных регионах России гораздо более заметен.

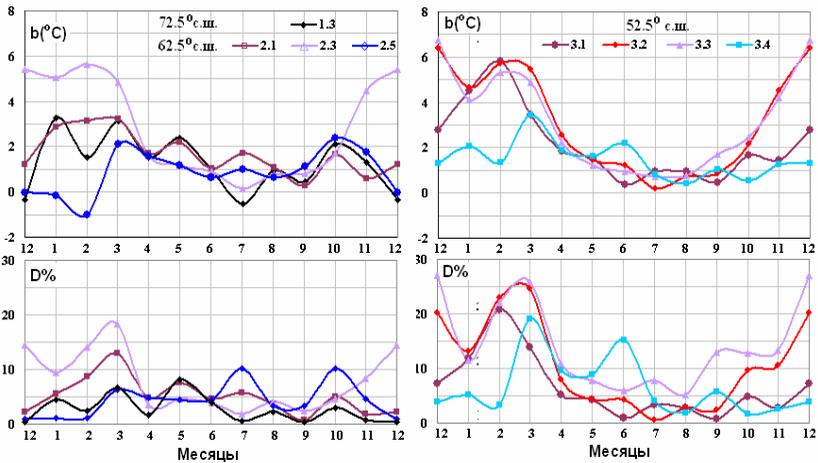


Рисунок 3.9 – Сезонный ход оценок отклика температуры в 5-градусных «боксах» на территории России на повышение среднегодовой глобальной температуры на 1 °C (объяснения см. в тексте): слева – ход отклика в широтных зонах 75–70 и 65–60° с.ш.; справа – ход отклика в широтной зоне 55–50° с.ш.; сверху – ожидаемые изменения региональных температур (b °C), внизу – доля изменчивости региональной температуры, объясняемая изменением глобальной температуры ($D\%$)

Полное представление о сезонных и географических особенностях отклика температуры на территории России на одноградусное глобальное потепление дают пространственные распределения на рис. 3.10 (а–д). На них показаны распределения ожидаемых оценок чувствительности температуры приземного воздуха на территории России к синхронному повышению глобальной температуры (оценки получены, как и представленные выше, по данным в 5-градусных «боксах» массива HadCRUT3 за 1909–2008 гг.). Результаты приведены для среднегодовой температуры и отдельно для каждого календарного месяца. Следует иметь в виду, что оценки чувствительности (отклик на потепление в 1 °C) можно использовать для прогноза ожидаемых изменений температуры в любом регионе России в ответ на определенный сценарий изменения глобальной температуры – достаточно умножить величину чувствительности (значение на карте для

заданного месяца в заданной точке) на величину ожидаемого глобального потепления.

Завершая данный раздел, уточним, что, говоря об «отклике региональных температур на определенные изменения глобальной температуры» или о «чувствительности локальных температур к изменению глобальной», мы не рассматриваем глобальную температуру как фактор или причину изменений региональных климатов. Глобальная температура выступает здесь как *индикатор*, т.е. некий индекс, который отражает суммарное влияние всех внешних и внутренних факторов, завершившееся наблюдаемым изменением климата, а представленные региональные оценки характеризуют региональный вклад в одноградусное глобальное потепление.

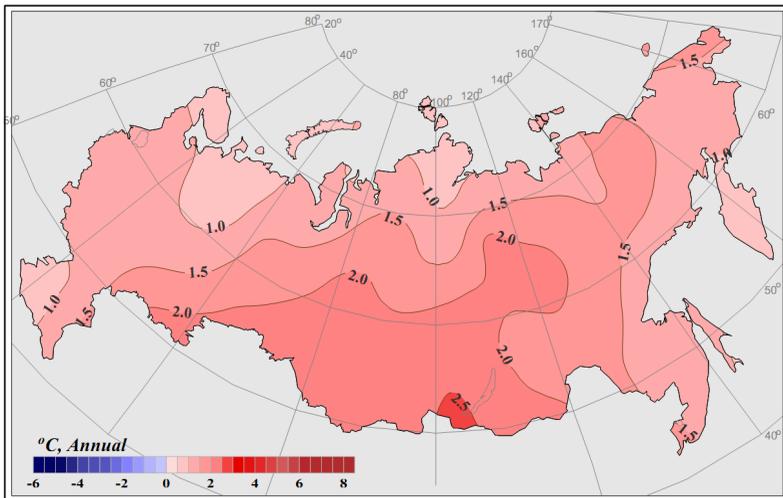


Рисунок 3.10 (а) – Оценки ожидаемых изменений температуры приземного воздуха на территории России при синхронном повышении глобальной температуры на 1 °С в среднем за год (а) и для каждого месяца (б–д). Оценки получены по данным Университета Восточной Англии

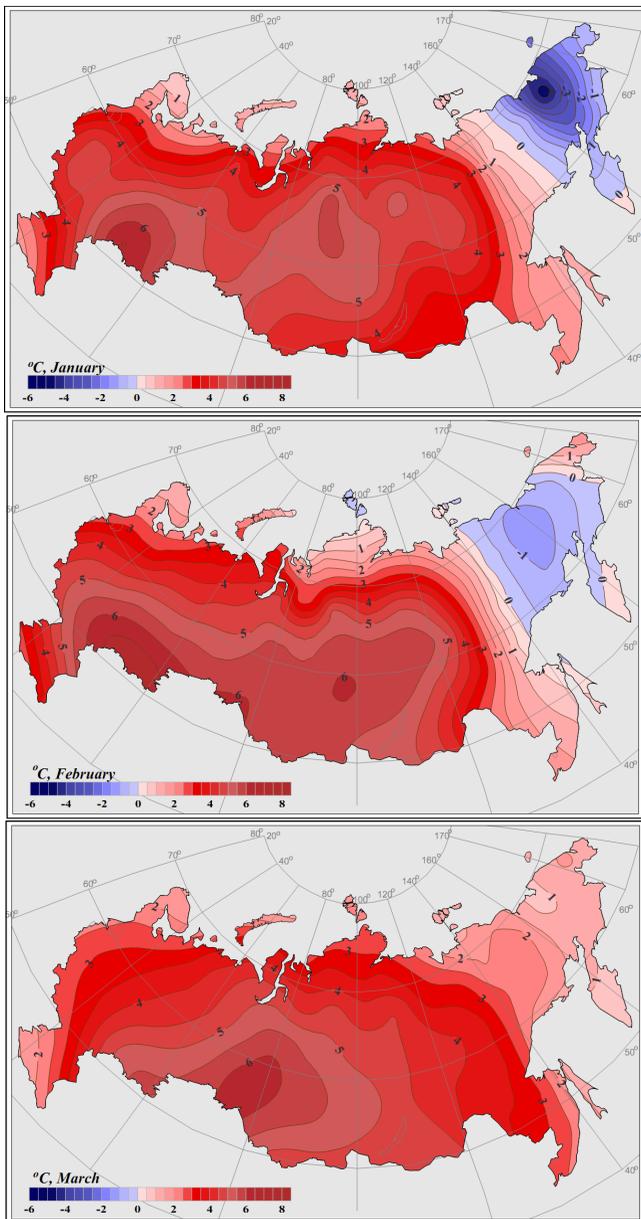


Рисунок 3.10 (б) – См. рис. 3.10 (а), но для января–марта

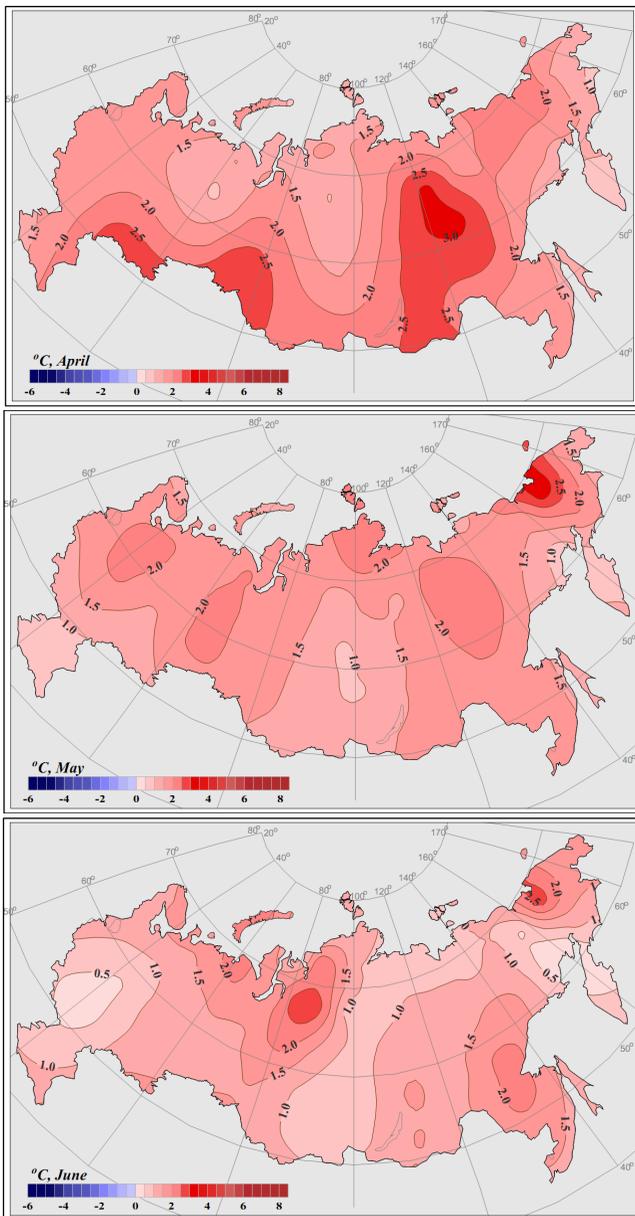


Рисунок 3.10 (в) – См. рис.3.10 (а), но для апреля–июня

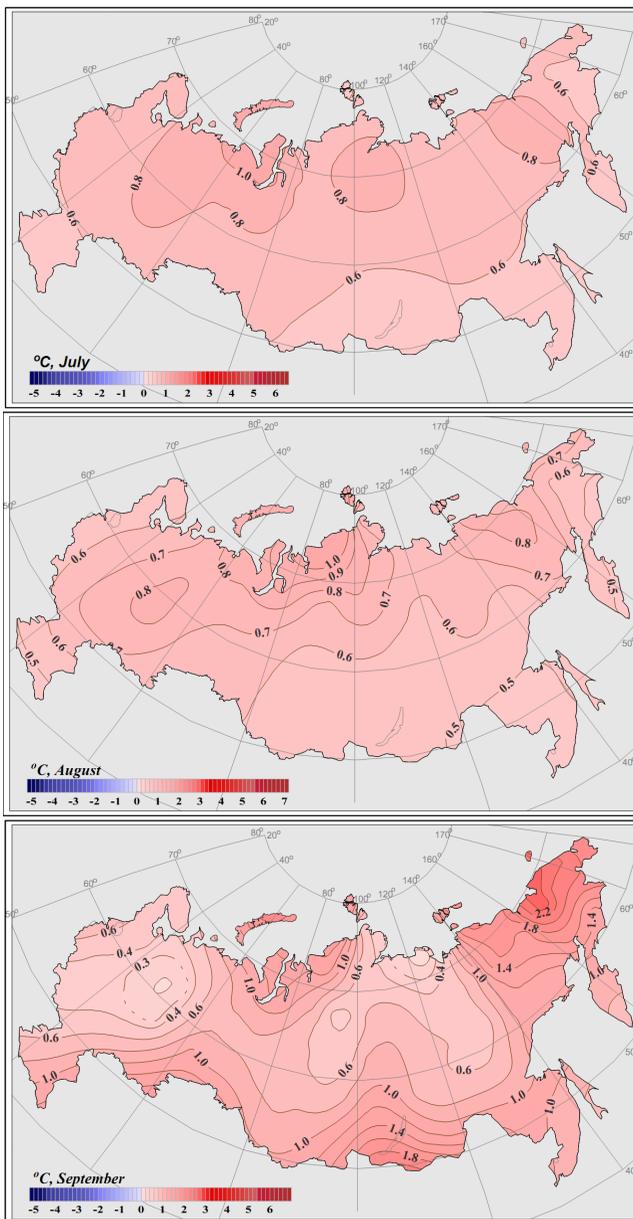


Рисунок 3.10 (г) – См. рис.3.10 (а), но для июля–сентября

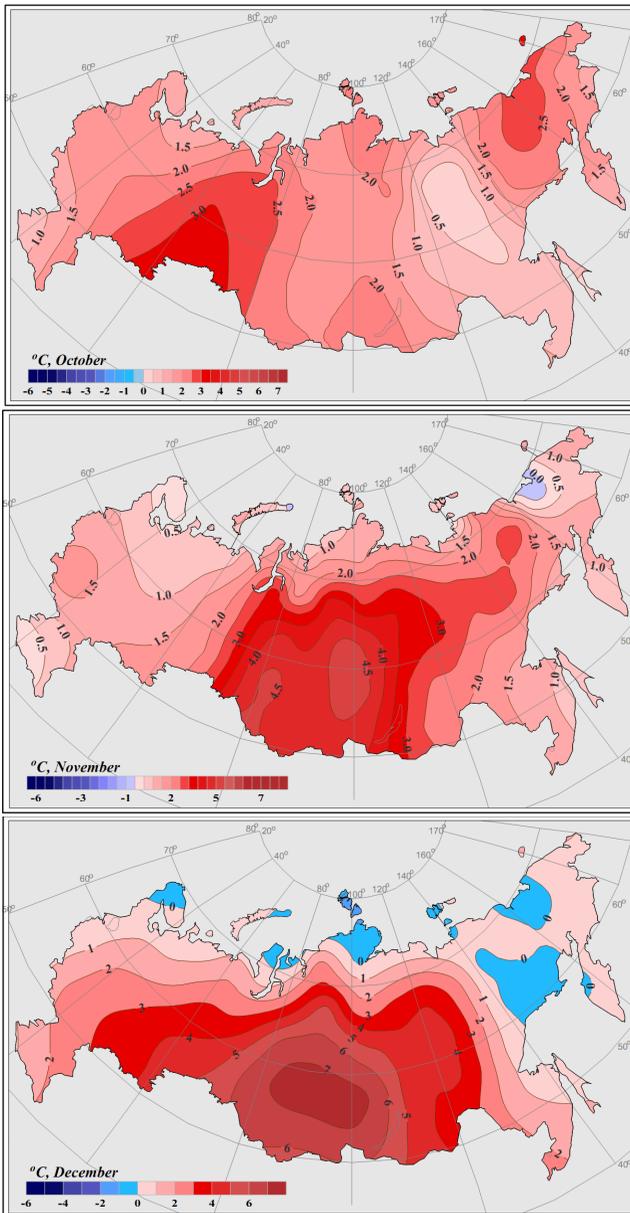


Рисунок 3.10 (д) – См. рис.3.10 (а), но для октября–декабря

Выводы

Размах годового хода температуры существенно выше в Северном полушарии, где он составляет около $13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Многолетняя средняя месячная температура меняется здесь от $7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в январе до $\sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в июле. Аналогичные оценки составляют $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ для Южного полушария (интервал от $10,6$ до $16,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) и около $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ для земного шара (интервал от $12,1$ до $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Амплитуда сезонного хода глобальной температуры на порядок превосходит ее изменение за 100 лет. Доминирующую роль в сезонном ходе приповерхностной температуры земного шара играет Северное полушарие.

Региональные проявления глобального потепления (или отклик региональных приповерхностных температур на изменение глобальной температуры) в январе более заметны, чем в июле и в целом за год. Наиболее интенсивный положительный отклик зимой имеет место в северных районах Северной Америки и Евразии, слабый отрицательный отклик наблюдается в районе Гренландии, Гольфстрима, Атлантического побережья Антарктиды, Чукотки. В июле положительный отклик значительно более слабый, а отрицательные отклики пренебрежимо малы.

Пределные оценки (процентиль 97,5) отклика среднегодовой, январской и июльской температуры значительно интенсивнее и практически всюду положительные.

Пространственные распределения оценок чувствительности локальных температур к одноградусному глобальному потеплению на рис. 3.10 уточняют сформулированные выводы для территории России, где сезонные (межмесячные) различия оказались весьма существенными, как и региональные. Приведенные на этих картах результаты представляют не только научный интерес, но могут быть полезны для практического использования в хозяйственной деятельности.

Напомним, что глобальная температура используется в регрессии как *индикатор*, отражающий *суммарное воздействие* всех факторов (включая неизвестные), завершившееся наблюдаемым изменением климата.

4. МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Мониторинг климата России: цели, задачи, практическая реализация

Осознание мировой общественностью важности учета климатических изменений и крупных климатических аномалий при принятии решений в области энергетики, промышленности и природопользования привело к необходимости организации системы непрерывного слежения за климатом (мониторинг климата). Система должна включать сбор и обобщение климатических данных, постоянную оценку текущих климатических аномалий и изменений климата, своевременное доведение климатической информации до руководящих органов и общественности.

В России система мониторинга климата развивается в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ). Концепция мониторинга природной среды была разработана Ю.А. Израэлем в 1974 году в работе, посвященной основам мониторинга (Израэль, 1974), где термин «мониторинг природной среды» впервые встречается в отечественной научной литературе и означает наблюдение или измерение с целью контроля или принятия решений. В своей монографии «Экология и контроль состояния природной среды» в 1979 г. Ю.А. Израэль указывает, что «для понимания изменений и колебаний климата необходимы данные о состоянии климатической системы атмосфера–океан–поверхность суши–криосфера–биота и о взаимодействии элементов этой системы за длительный период времени, т. е. осуществление климатического мониторинга». Такое определение выделило мониторинг климата в самостоятельный раздел климатологии, поскольку в нем изменение климата исследуется в совокупности со всеми другими изменениями, происходящими в природной среде.

Мониторинг является многоцелевой информационной системой. Основные задачи климатического мониторинга, по мнению Ю.А. Израэля: наблюдение за состоянием природной среды, оценка и прогноз ее состояния; определение степени антропогенного воздейст-

вия на окружающую природную среду; выявление факторов и источников такого воздействия, а также степени их воздействия. Специальный раздел мониторинга посвящен здоровью и благосостоянию населения. Именно мониторинг способен выявить пределы, в которых возможно устойчивое развитие природной среды.

В работе (ГР, 1989) в качестве основных целей мониторинга климата названы:

- регулярное слежение за состоянием климатической системы, в том числе сбор и обобщение климатических данных и определение характеристик текущего климата земного шара;

- вероятностная оценка степени аномальности состояния климатической системы;

- выявление естественных и антропогенных причин наблюдаемых аномалий.

К целям мониторинга климата можно отнести также и оценку масштабов вероятных изменений и колебаний климата в будущем.

Выполняемый в настоящее время силами научных учреждений Росгидромета (ИГКЭ, ВНИИГМИ-МЦД, Гидрометцентр России, ГГО, ААНИИ, ГГИ, ЦАО, ВНИИСХМ) регулярный мониторинг климата Российской Федерации позволяет осуществлять в квазиреальном времени оценку наблюдаемых климатических аномалий. Мониторинг климата выполняется по данным оперативных наблюдений (с каналов связи) с подготовкой месячных, сезонных и годовых бюллетеней.

Для анализа региональных климатов рассматриваются пространственно-осредненные значения аномалий метеорологических переменных (отклонений от средних значений базового периода 1961–1990 гг.). Для их расчета используется алгоритм осреднения точечных данных (на станциях наблюдений) по региону с предварительным осреднением по широтно-долготным квадрантам («боксам»). Область анализа (земной шар, полушарие, регион) покрывается сетью «боксов» заданного размера, и производится осреднение (арифметическое) значений анализируемой переменной на станциях внутри каждого «бокса»; затем полученные значения усредняются с весами, пропорциональными площади пересечения «боксов» с территорией региона.

Сезонные средние значения аномалий метеорологических величин рассчитываются осреднением месячных аномалий на станциях для зимы (декабрь–февраль), весны (март–май), лета (июнь–август) и осени (сентябрь–ноябрь) при наличии данных не менее чем за два месяца в сезоне. Средние годовые значения рассчитываются для календарного года (январь–декабрь) при наличии не менее 11 среднемесячных значений и для «сезонного» года (декабрь–ноябрь) осреднением всех четырех сезонных аномалий.

Выпуск месячных бюллетеней «Данные мониторинга климата» был начат в 1984 году. Идеи и технология подготовки данных для ежемесячного мониторинга климата положены в основу методики подготовки годовых бюллетеней мониторинга климата «Изменения климата России», которые выпускаются с 1997 года и включают данные о сезонных и годовых аномалиях температуры воздуха и осадков, а также о некоторых климатических индексах. С 1999 года бюллетень «Изменения климата России» выпускается ежесезонно и размещается на Интернет-сайте <http://climatechange.su>.

С 1999 года материалы годовых и сезонных обобщений «Климатические особенности и аномалии климата на территории Российской Федерации» включаются в ежегодные обзоры состояния окружающей среды России, а с 2005 года, кроме того, выпускается Ежегодный доклад Росгидромета об особенностях климата на территории России в истекшем году (<http://climate.mecom.ru>).

4.2. Метеорологические данные для мониторинга климата

Основные требования к базовым сетям для мониторинга климата сформулированы в рамках Глобальной системы наблюдений за климатом (GCOS, 2002; Peterson et al., 1997). Используемая сеть станций должна обеспечивать непрерывность наблюдений, их географическую репрезентативность (освещенность территории), однородность и приемлемую длину доступных временных рядов. Местоположение и окрестность станций не должны подвергаться существенным изменениям, и антропогенные влияния не должны сказываться на локальном климате – практически это означает предпочтение станций в сельской местности. Должно уделяться внимание включению высокогорных станций.

За основу массивов исторических данных, как и данных текущих наблюдений, приняты месячные данные телеграмм КЛИМАТ (как требующие меньшей специализированной обработки в условиях неизбежных пропусков наблюдений и локальных сроков синоптических наблюдений по местному времени).

4.2.1. Данные стационарных наблюдений

Базовый массив данных стационарных наблюдений о приземной температуре создан в ИГКЭ в начале 1990-х гг. на основе данных наблюдений практически всех действующих на тот момент станций (т.е. всех станций, передающих телеграммы КЛИМАТ). С этой целью были использованы все доступные архивы на технических носителях, имеющиеся на то время во ВНИИГМИ-МЦД и предоставленные другими НИУ Росгидромета и РАН. В ИГКЭ был выполнен предварительный контроль этих архивов, главным образом, на основе анализа статистик за разные периоды и выбросов значений климатических переменных и/или их аномалий за критические уровни. Было также выполнено сопоставление одноименных данных в разных архивах. В сомнительных случаях данные были выверены и исправлены по ежемесячникам. Сводный архив, составленный в ИГКЭ с учетом выполненных сопоставлений, включал на начальном этапе данные более чем 4 000 станций мира.

В результате анализа полноты рядов и их однородности была сформирована сеть станций для мониторинга климата и исследований изменений климата. В нее были включены станции с началом наблюдений не позже 1951 года и притом отвечающие двум требованиям. Во-первых, станции должны были быть действующими (т.е. передавать телеграммы КЛИМАТ в реальном времени) и иметь в рядах наблюдений не более 10 % пропусков, которых практически не должно было быть в базовом периоде 1961–1990 гг. (период расчета норм). Оказалось, что предъявленным требованиям к климатической информации (одновременно для обеих переменных – температуры и осадков) из ~4 000 станций отвечают 1 383 станции, которые и составили основу информационной базы мониторинга климата.

Временные ряды среднемесячной температуры на этих станциях были объединены в один набор данных (базовый массив мониторинга

климата по температуре приземного воздуха) и организованы в нем как хронологически упорядоченная временная последовательность полей температуры, в которых станции упорядочены по возрастанию их индексов (по каталогу ВМО). Наиболее длинные временные ряды в этом массиве содержат данные с 1886 года. Для отдельных станций имелись данные за более ранние годы, но в базовый массив мониторинга климата они включены не были. В результате, данные о приземной температуре в информационной базе мониторинга климата представлены базовым массивом T1383, содержащим данные о средней месячной температуре воздуха на 1 383 станциях глобальной сети метеорологических наблюдений с 1886 года. В процессе мониторинга климата этот массив ежемесячно пополняется в квазиреальном времени оперативными наблюдениями с последующим многоступенчатым контролем и верификацией.

В базовом массиве мониторинга климата T1383 постсоветская территория (далее – территория СНГ) представлена 455 станциями, в том числе 310 – на территории России. Напомним, что на всех этих станциях временные ряды начинаются не позднее 1951 года и до 1991 года содержат не более 10 % пропусков. К сожалению, в связи с политической обстановкой на постсоветской территории в период с 1991–1995 гг. ряд станций перестали функционировать, так что сеть заметно ухудшилась и до сих пор практически не восстановилась.

История развития используемых сетей, глобальной и на территории СНГ (на основании полноты данных, представленных в базе мониторинга климата), отражена на рис. 4.1. Можно видеть, что на территории СНГ стабильная сеть метеонаблюдений сформировалась лишь к 1950-м гг., сократилась до 64 % к 1994 году, а к 2005–2010 гг. восстановилась лишь до 78,5 %.

Географическая локализация станций базового архива для территории России представлена на рис. 4.2. Большая часть станций с длиннорядными наблюдениями расположена в европейском секторе. Плохо освещены данными северные территории. Основной массив наблюдений на азиатской территории страны начинается с середины 30-х гг. К 1936 г. количество действующих станций на территории СНГ составило 340.

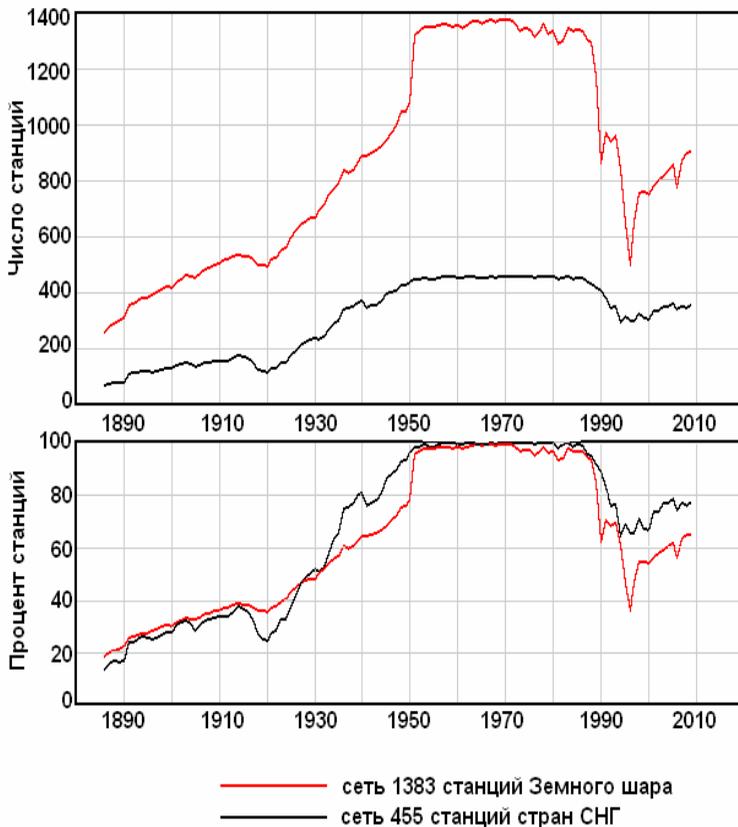


Рисунок 4.1 – Изменение полноты данных о температуре в базе данных мониторинга климата для глобальной сети станций (n=1383, красные кривые) и для сети станций стран СНГ (n=455, черные кривые)

4.2.2. Климатические индексы и статистики

Кроме базовых массивов с данными на станциях, в описываемой системе мониторинга климата задействованы массивы с расчетными характеристиками, среди которых – все виды аномалий (на станциях и в региональном обобщении) и характеристики климатических экстремумов для временных масштабов месяц–сезон–год.

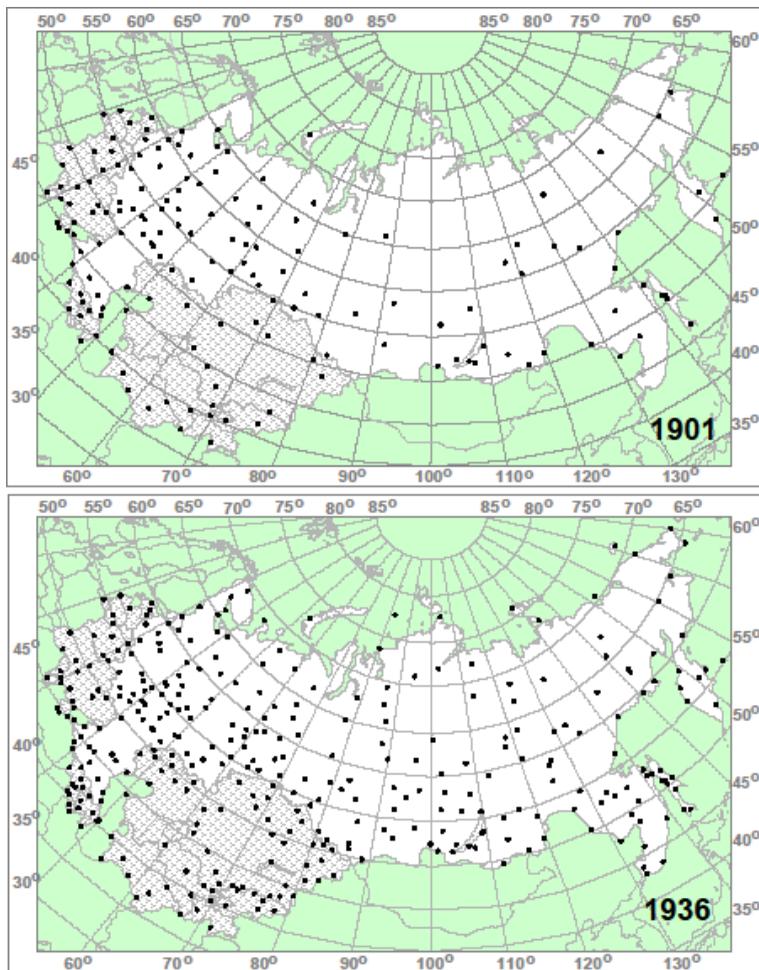


Рисунок 4.2 – Сеть станций на территории СНГ и Балтии с началом наблюдений не позже 1901 г. (вверху) и 1936 г. (внизу).

Норма климатической переменной определяется как много-летняя средняя величина за определенный интервал времени (базовый период), за который, согласно действующим рекомендациям ВМО, принимается период 1961–1990 гг. Обозначение: $E^y X_y$ (X_y – значение

климатической переменной X в году y , E^y – оператор осреднения по множеству лет, т. е. по индексу «год»).

Аномалия климатической переменной (средней месячной/сезонной/годовой температуры, на станции или в среднем для любого региона) определяется как отклонение от климатической нормы и рассчитывается по формуле:

$$(V^y X_y)_y = X_y - E^y X_y$$

Здесь $(V^y X_y)_y$ – значение искомой аномалии в году y . Эту формулу условимся записывать проще: $(V^y X)_y = X_y - E^y X$, или $(VX)_y$ или даже VX_y .

Нормированная, или стандартизованная, аномалия определяется как аномалия в долях статистики масштаба:

$$(W^y X)_y = (V^y X)_y / S^y X = (X_y - E^y X) / S^y X$$

Здесь $S^y X$ означает стандартное отклонение переменной X , рассчитанное за тот же базовый период. Нормированная аномалия применяется в основном для величин с приблизительно симметричным распределением (температура). Для осадков, имеющих выраженное асимметричное распределение, ограниченное с одной стороны, больше применим индекс «относительная аномалия», обычно выражаемый в процентах от нормы.

Вероятности непревышения наблюдаемого значения температуры fX_y (или, что то же самое, вероятность непревышения значений VX_y или WX_y) – еще одна стандартизованная шкала для оценки аномалий. Под ней понимается значение функции распределения $F(X_y)$, соответствующее наблюдаемому (текущему) значению рассматриваемой величины: $fX_y = F(X_y) = P(x \leq X_y)$. Значение $fX_y = F(X_y)$ называют также обеспеченностью значения X_y . Как правило, вероятности непревышения оцениваются как эмпирические вероятности (частоты) с использованием доступных данных за базовый период или за весь период наблюдений (при отсутствии в рядах длительных пропусков). Для температуры вероятность непревышения тесно связана с величиной нормированной аномалии (как для случайных величин с нормальным распределением).

Под *климатическими экстремумами* обычно понимаются редкие климатические аномалии сезонных и годовых значений исследуемых величин (в данном случае – температуры), определяемые в том числе с использованием вероятностных показателей (Ранькова, Груза, 1998; Gruza et al., 1999). В основе этих индексов – вероятности превышения наблюдаемых значений в точках поля – на станциях или в узлах сетки.

Для характеристики экстремальности текущего состояния используется доля площади (Q – quota), занятая экстремальными значениями заданной обеспеченности. Такое обобщение индексов экстремальности по площади региона правомерно, поскольку, как величины нормированные, они имеют одинаковые характеристики положения и масштаба, т.е. близкие «области изменения». В зависимости от шкалы, в которой назначаются критерии, это могут быть аномалии выше заданного уровня в абсолютной шкале (например, $T < -5$ °C); в нормированной шкале (например $VT > 2\sigma_T$, или $WT > 2$) либо в вероятностной шкале (например $fT > 90$ %).

В текущей версии базы данных индексы экстремумов представлены для территории Российской Федерации в целом и для больших регионов (физико-географических и федеральных округов). В качестве примера можно назвать доли площади с аномалиями ниже 20-го перцентиля $Q_{f<0,2}$ или выше 80-го перцентиля $Q_{f>0,8}$.

4.2.3. Индикаторы меняющегося климата

В различных регионах и на различных интервалах времени статистические характеристики климата и изменений климата существенно различаются. Осреднение по времени и по пространству позволяет охарактеризовать климатическую изменчивость во времени и пространстве, соответственно. Табл. 4.1 иллюстрирует такое применение статистических характеристик для описания состояния и изменений климата некоторого региона для двух интервалов времени.

В работах (РГ, 1998; Gruza et al., 1999) для количественной оценки региональных изменений климата предложен ряд показателей, вычисляемых по данным о месячных температуре и осадках на станциях региона. В частности, предложены индекс аномальности климата (CAI) и индекс изменения климата (CCI).

Индексы состояния и изменения климата

Статистики по пространству	Статистики по времени		
	Состояние климата		Изменение климата $dE=E1-E2$
	Период-1: E1	Период-2: E2	
$E = Mean$	$E(E1)=EE1$	$E(E2)=EE2$	$E(dE)=EdE$
$S = std$	$S(E1)=SE1$	$S(E2)=SE2$	$S(dE)=SdE$
$Q = RMS$	$Q(E1)=CAI_1$	$Q(E2)=CAI_2$	$Q(dE)=CCI$

Индекс аномальности климата (CAI – Climate Anomaly Index) определяется как Евклидово расстояние между точкой, описывающей текущее состояние климата, и точкой, представляющей состояние среднего значения по времени (норму):

$$CAI_y = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_{yi} - \bar{z}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right]}$$

Чем больше CAI, тем дальше удалена точка, представляющая мгновенное состояние климата, от «центра» точек-состояний климата. Положение «центра» чаще всего оценивается по всему доступному периоду наблюдений.

Индекс изменения климата (CCI – Climate Change Index) определяется как Евклидово расстояние между двумя точками, описывающими состояния климата в моменты времени y_1 и y_2 :

$$CCI_{y_1 y_2} = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_{y_1 i} - z_{y_2 i}}{\sigma_i} \right)^2 \right]}$$

Понятия CAI и CCI отображены в последней строке табл. 4.1, из которой ясен смысл предлагаемых характеристик.

Весьма информативным также представляется **индекс экстремальности климата** (CEI). Он оценивается для конкретного метеорологического параметра в конкретный момент (период) времени как доля площади региона с экстремальными текущими аномалиями рассматриваемого параметра обоих знаков (например, это

аномалии, попавшие в 10%-е интервалы на обоих «хвостах» климатического распределения этого параметра).

Количественные оценки изменений индексов экстремальности и аномальности климата, а также интенсивности изменений климата получены для территории России в целом и некоторых ее регионов по данным о температуре приземного воздуха за 1951–2000 гг. В работах (ГР, 2001, 2003, 2004) было показано, что индекс аномальности климата и индекс изменений климата слабо коррелируют между собой, но в течение нескольких последних десятилетий оба определенно увеличивались, как и индекс экстремальности климата.

Ниже приводятся результаты расширенного (за 1850–2011 гг.) анализа индексов аномальности климата CAI и изменений климата CCI (рис. 4.3 и 4.4) по данным о приповерхностной температуре в 5-градусных «боксах» за 1850–2011 гг. (данные Великобритании, CRUTEM3, <http://www.cru.uea.ac.uk> – см. раздел 2). Ход индексов представлен здесь в виде «фазовой траектории» на координатной плоскости CAI (ось X) – CCI (ось Y). Каждая точка соответствует одной паре соседних непересекающихся периодов (10-летий или 30-летий), которая маркирована конечным годом первого периода. Точки соединены в хронологическом порядке. Абсцисса точки соответствует аномальности климата (CAI) первого периода, а ее ордината (CCI) указывает масштаб изменения «климата» от первого периода ко второму (без учета направленности изменений). Понятно, что удаление траектории от оси Y говорит об увеличении аномальности климата на данном отрезке времени (температурный режим данного периода в большей мере отличается от «генерального» режима 1850–2011 гг.), а удаление от оси X – о наличии климатических изменений от первого периода ко второму.

На рис. 4.3 показаны результаты для 5-градусного пояса вдоль параллели 52,5° с.ш. внутри Евразийского сектора (10° з.д., 140° в.д.). На верхнем фрагменте приведены траектории для 10-летних периодов (base=10 лет), а на нижнем – для 30-летних (base=30 лет). Для наглядности точки траектории, относящиеся к разным 50-летиям, выделены разной маркировкой (см. легенду к рис. 4.4). В траектории включены 10-летия и 30-летия с конечным годом, кратным 5.

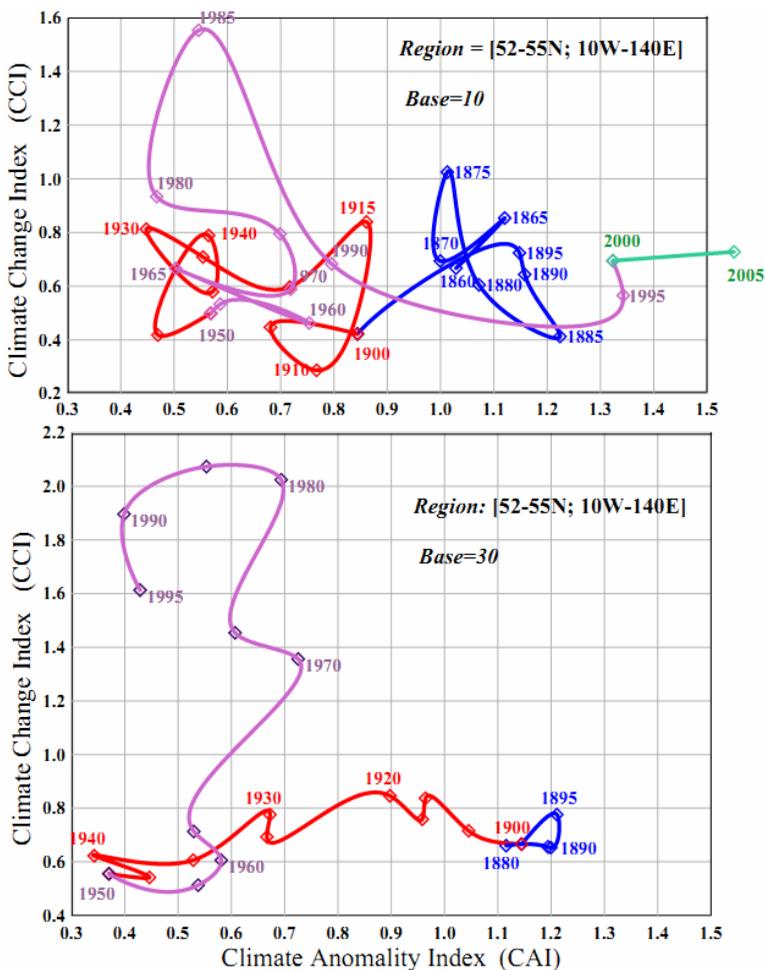


Рисунок 4.3 – Траектория изменений во времени (с шагом 5 лет) показателей «аномальности климата» (CAI, ось X) и «изменений климата» (CCI, ось Y) вдоль широты 52,5° с.ш. Евразийского сектора (10° з.д.–140° в.д.), 1850–2011 гг. Оценки получены по средним 10-летним (вверху) и 30-летним (внизу) значениям аномалий приповерхностной температуры в 5-градусных «боксах» (массив CRUTEM3). *Объяснения см. в тексте. Легенду см. на рис. 4.4.*

Из рисунка видно, что картина существенно зависит от временного масштаба рассматриваемых климатов.

В масштабе 10-летий выделяются несколько климатических режимов. *Первый «режим»* (1860–1900 гг., синяя маркировка) – квазистационарный климат, существенно отличающийся от «генерального климата» (условное название климата всего периода 1850–2011 гг. для 10-летних средних), но мало меняющийся от десятилетия к десятилетию.

Второй «режим» начался с 1900-х гг. (т.е. при переходе от 1891–1900 к 1901–1910 гг.) и далее, с малыми изменениями между соседними десятилетиями, сохранился до 1970–1975 гг. (красная маркировка для 1900–1950 гг. и сиреневая – для 1950–1975 гг.). Климат десятилетий этого периода близок к «генеральному» (абсцисса существенно уменьшилась), и по-прежнему малы различия между смежными десятилетиями (ординаты колеблются на одном уровне). Правда, по значениям абсцисс можно разбить этот период на 1900–1925 и 1930–1970 гг., но эти различия не столь заметны, так как междесятилетние изменения не были монотонными, особенно в 60–70-е гг.

В 1970-х гг. (точнее в момент перехода от 1961–1970 к 1971–1980 гг.) происходит скачкообразное изменение климата вплоть до 1985 г. (от 1976–1985 к 1986–1995 гг.), зафиксированное на траектории четырьмя точками: 1970–1975–1980–1985 – это *третий климатический режим*.

После десятилетия 1976–1985 гг. (*последний «климатический режим»*) изменения климата не столь существенны – ордината резко снизилась и для точек 1990–1995–2000–2005 остается примерно на одном уровне. Однако аномальность относительно 150-летнего климата резко увеличивается и достигает максимальных значений в точке 2005 г. (десятилетие 1996–2005 гг.). Аномальность (CAI) десятилетия 2001–2010 гг. здесь не показана, так как для этого периода пока нельзя рассчитать индекс изменения климата (CCI) к следующему десятилетию, т.е. к 2006–2015 гг.

Мы столь подробно прокомментировали данный рисунок, чтобы показать, что высвеченные этим рисунком особенности изменения десятилетних климатов вполне согласуются с хорошо известной хронологией глобального потепления, притом что здесь речь идет о климатическом режиме в умеренных широтах Евразии.

В масштабе 30-летий (именно этот масштаб был рекомендован ВМО для оценки «климатических норм»), как следует из нижнего

фрагмента на рис. 4.3, траектория климатических изменений выглядит совершенно иной.

Начиная с конца XIX и до середины XX столетия (точки 1940–1950 гг.) аномальность температурного режима убывала на фоне сравнительно небольших изменений климата (ордината точки максимума «1920» соответствует изменению 30-летнего климата от 1891–1920 к 1921–1950 гг.). Оба индекса, САI и ССI, в точке «1950» достигли своего минимума. В следующие 3–4 десятилетия аномальность колебалась в очень незначительном диапазоне значений (траектория почти вертикальна), но после 30-летия 1956–1985 гг. (точка «1985») снова уменьшилась до минимальных значений (т.е. современные 30-летние нормы приблизились к 150-летнему климату).

Масштаб изменений климата смежных 30-летий, напротив, в течение столетия сохранялся примерно на одном уровне и начал расти лишь после 1961–1990 гг. С этого момента масштаб климатических изменений, как и в случае 10-летних климатов, резко увеличился и достиг максимума в точке «1985». Но далее, в отличие от 10-летних норм, индекс изменений 30-летних климатов остается высоким, хотя и снизился до отметки 1,6. Итак, судя по ходу индекса ССI, изменения 30-летних средних пока продолжают и их интенсивность, если и снизилась, то незначительно. Правда, индекс ССI для двух последних точек рассчитан по неполным данным (в точке «1995» второе 30-летие 1996–2025 гг. представлено 16 значениями из 30, т.е. принятый в расчетах 50%-ный критерий наличия данных обеспечен).

Таким образом, соответствие между закономерностями наблюдаемых климатических изменений в умеренных широтах Евразии и хронологией глобального потепления прослеживается для 30-летних климатов еще более четко, чем для 10-летних.

Интересно проследить, в какой мере отмеченные закономерности характерны для других крупных территорий мира. На рис. 4.4 показаны аналогичные результаты для земного шара и Северного полушария в целом и отдельно для пояса умеренных широт Северного полушария и Арктического пояса.

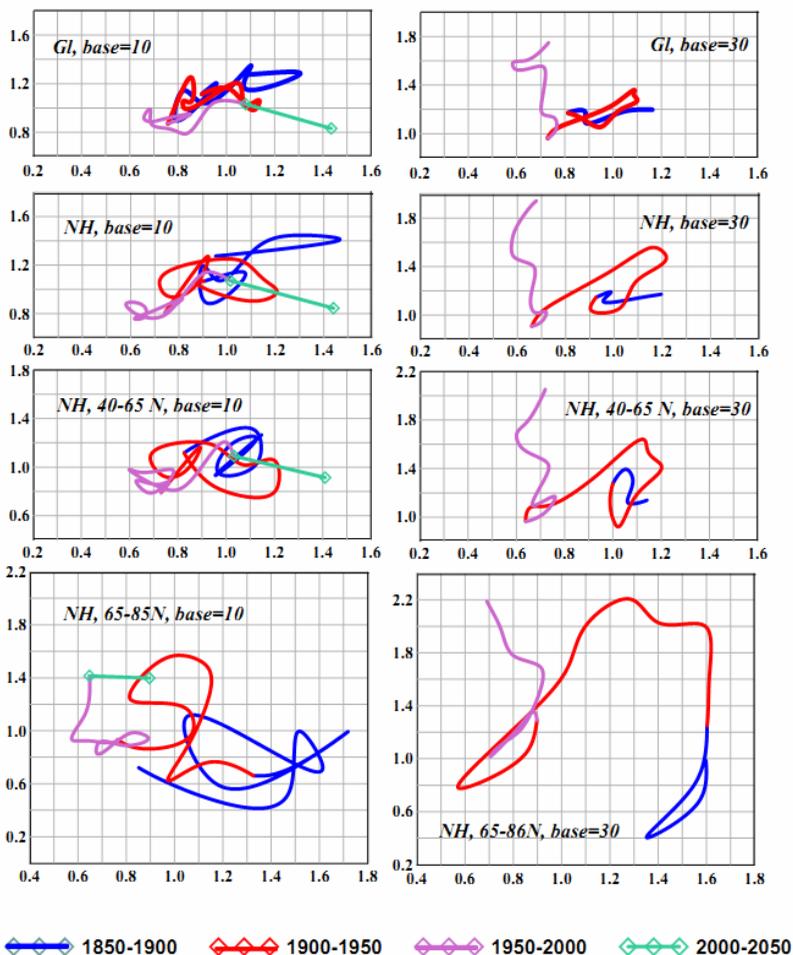


Рисунок 4.4 – См. рис. 4.3, но для других территорий (сверху вниз): Земной шар (GI); Северное полушарие (NH); пояс умеренных широт Северного полушария (40–65° с.ш.); Арктический пояс (65–85° с.ш.).

По-видимому, основные отмеченные выше особенности действительно прослеживаются для всех территорий, кроме Арктического пояса. Здесь видны существенные отличия как в ходе индексов для 10-летних климатов (слева), так и 30-летних (справа), но относятся они, главным образом, к концу XX–началу XXI столетия, т. е. к

современным изменениям климата. Представляется, что этот факт достоин пристального внимания, и анализ следует продолжить с привлечением новых данных и по мере поступления новых наблюдений.

Возвращаясь к вопросу об объектах мониторинга климата в условиях меняющегося климата, отметим, что для изучаемых периодов времени оказывается недостаточным традиционный набор климатических переменных, включавшихся обычно в климатические справочники. Как правило, при выборе климатических переменных, как и при назначении интервала времени для их оценивания, постулировалось постоянство или стационарность климата, что уже не соответствует представлениям о современном климате. В частности, стандартный 30-летний интервал для вычисления климатических норм целесообразно применять далеко не во всех случаях. В целом ясно, что при изучении климатических временных рядов в настоящее время будут полезны методы и алгоритмы анализа нестационарных случайных процессов и их реализаций.

Напомним, что в соответствии с введенными выше определениями климатических переменных, к ним относятся и скользящие средние величины (например 10-летние); и результаты фильтрации, содержащие низкочастотные составляющие процессов; и значения трендов, выделенных в соответствии с некоторой гипотезой. Все перечисленные величины в каждый конкретный момент можно рассматривать как некоторые «динамические климатические нормы», которые могут в некотором смысле лучше характеризовать текущий климат, чем стандартные нормы фиксированного базового периода. Здесь мы ограничимся рассмотрением линейных трендов и сглаженных скользящих средних величин.

4.3. Оценки климатических изменений температурного режима на территории Российской Федерации как задача оперативного мониторинга климата России

Выше в числе основных задач мониторинга климата были названы:

- 1) регулярное слежение за состоянием климатической системы;
- 2) вероятностная оценка степени его аномальности;

3) выявление естественных и антропогенных причин наблюдаемых аномалий.

В условиях меняющегося климата вторая и третья задачи, по существу, трансформируются в задачу обнаружения изменений климата и установления их причин, а собственно мониторинг климата предполагает дополнительно и мониторинг изменений климата.

В этой ситуации регулярно обновляемая оценка климатических изменений температурного режима становится прямой задачей оперативного мониторинга климата, продукция которого с определенной регулярностью публикуется в бюллетенях, специализированных обзорах и докладах о состоянии климата. В частности, регламентированная продукция мониторинга климата, выполняемого ИГКЭ, включает:

– бюллетени мониторинга климата (сезонные и годовые): выпускаются ежесезонно, с запаздыванием 1,5 месяца; размещаются на сайте ИГКЭ (<http://climatechange.su>); в настоящее время на сайте доступны все бюллетени с 1998 года;

– доклад Росгидромета «Об особенностях климата на территории России»: выпускается ежегодно с 2005 года; размещается на сайте Росгидромета (<http://www.meteorf.ru>) с двухмесячным запаздыванием (к 1 марта следующего года).

Как правило, климатические обзоры (бюллетени и доклад) содержат три раздела: состояние климата в текущем году (наблюдаемые аномалии и их вероятности превышения), текущие тенденции в изменении климата (тренды за период с 1976 года по текущий год) и временные ряды регионально осредненных величин за доступный период наблюдений, кончающийся текущим годом. В первых двух разделах представлены поля точечных оценок (в точках расположения станций) и их региональные обобщения для всей территории России и выбранных регионов (также в терминах аномалий, рангов и вероятностей превышения). Что касается временных масштабов, то бюллетени и ежегодный доклад содержат как месячные данные, так и средние для календарных сезонов и для года в целом. Зимний сезон включает декабрь предыдущего года. Среднегодовые значения относятся к календарному году, т.е. к интервалу времени с января по декабрь рассматриваемого года.

Пространственное осреднение выполняется по стационарным данным об аномалиях климатических переменных с использованием двухступенчатой процедуры. На первом этапе территория региона покрывается регулярной сеткой (разрешением $2,5^\circ$ широты на 5° долготы) и в каждой ячейке сетки рассчитывается среднее арифметическое из значений аномалий на попавших в эту ячейку станциях. На втором этапе выполняется взвешенное осреднение ячейечных средних с весами, пропорциональными площади пересечения ячейки с территорией региона.

Аналогичным образом, по данным о стационарных нормах (средних многолетних за базовый период) для каждого региона рассчитываются региональные нормы. Регионально осредненные значения самих климатических переменных рассчитываются суммированием региональных норм и региональных аномалий (этот алгоритм уменьшает смещение оценок, вызываемое пропусками в рядах наблюдений).

Ниже приводится краткое описание температурного режима 2011 года (в качестве примера регламентированной продукции климатического мониторинга). Оценки изменений климата (трендов) на территории России получены здесь с учетом данных по 2011 год и описываются более подробно как представляющие самостоятельный интерес (до завершения 2012 года это оценки «по новейшим данным наблюдений»). Все оценки воспроизведены по данным «Доклада об особенностях климата на территории России за 2011 год».

4.3.1. Особенности температурного режима в 2011 году.

В среднем по территории России среднегодовая температура приземного воздуха в 2011 году превысила норму 1961–1990 гг. на $1,55^\circ\text{C}$. Ход средних годовых и сезонных аномалий температуры, осредненных по территории России, приведен на рис. 4.5.

Можно видеть, что 2011 год вошел в пятерку самых теплых лет, повторив температуру 2005 года. Более теплыми были рекордный 2007 год (выше нормы на $2,08^\circ\text{C}$) и следующие за ним 1995 и 2008 гг. (аномалии $+2,05$ и $+1,86^\circ\text{C}$, соответственно).

Из сезонов в целом по России выделяются экстремально теплые весна и лето (аномалии $+2,56$ и $+1,40^\circ\text{C}$, соответственно). При этом

весна оказалась второй после 1990 года (+3,12 °С), а лето – третьим после уникального 2010 года (+1,78 °С) и вслед за 1998 годом (+1,45 °С).

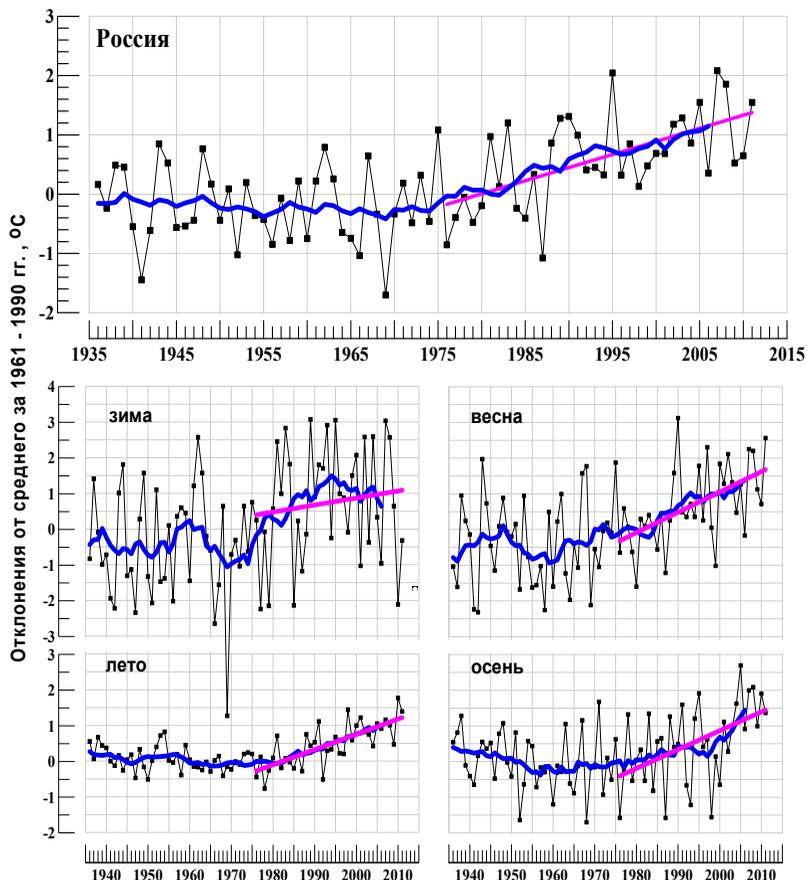


Рисунок 4.5 – Средние годовые (вверху) и сезонные аномалии температуры приземного воздуха (°С), осредненные по территории Российской Федерации, 1936–2011 гг.

Аномалии рассчитаны как отклонения от среднего за 1961–1990 гг. Сглаженная кривая получена 11-летним скользящим осреднением. Линейный тренд проведен по данным за 1976–2011 гг.

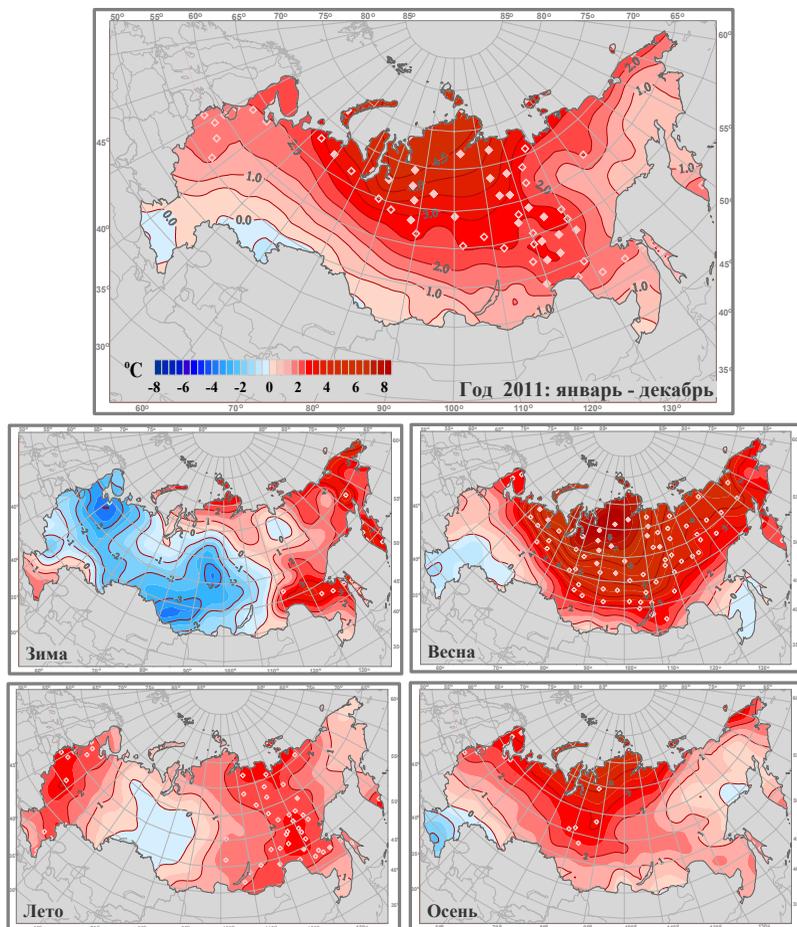


Рисунок 4.6 – Поля аномалий средней годовой и сезонных температур приземного воздуха на территории России в 2011 г. (отклонения от средних за 1961–1990 гг.) с указанием локализации экстремальных аномалий.

Ромбами показаны станции, на которых наблюдаемая температура оказалась ниже 5-го или выше 95-го процентиля. Станции, на которых температура 2011 года оказалась рекордной, отмечены залитым ромбом

В дополнение к точечным оценкам на рис. 4.6, в табл. 4.2 приведены количественные данные об аномалиях температуры, осредненных по территории России в целом и по площади ее шести физико-географических регионов и восьми федеральных округов.

Таблица 4.2

Пространственно-осредненные аномалии температуры приземного воздуха в 2011 г., в среднем за год и по сезонам, для территории России, ее регионов и федеральных округов: vT_{2011} , °C – отклонения от средних 1961–1990 гг.; R – ранг в ряду убывающих температур с 1936 г.

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	vT_{2011}	R								
Российская Федерация (РФ)	1,55	5	-0,31	47	2,56	2	1,40	3	1,36	9
Физико-географические регионы России										
Европейская часть РФ	0,97	16	-1,40	58	0,70	22	1,73	7	0,97	19
Западная Сибирь	1,51	8	-1,87	59	3,33	3	-0,02	43	2,10	8
Средняя Сибирь	2,62	1	-0,53	50	4,79	2	1,62	4	2,03	13
Прибайкалье и Забайкалье	1,43	7	-0,51	46	2,51	5	1,78	4	0,92	18
Приамурье и Приморье	1,51	3	2,65	5	0,48	26	1,84	1	1,36	9
Восточная Сибирь	1,40	8	1,93	8	3,23	4	1,63	3	0,72	36
Федеральные округа РФ										
Северо-Западный	1,93	5	-2,53	66	2,30	6	1,66	8	2,42	3
Центральный	1,32	12	-1,30	50	0,58	25	2,58	5	1,05	15
Приволжский	0,30	31	-1,18	54	-0,08	39	1,32	13	0,62	31
Южный	0,10	34	-0,01	38	-0,71	48	1,96	6	-0,87	58
Северо-Кавказский	-0,15	45	1,39	18	-0,74	51	1,36	11	-1,74	71
Уральский	1,94	8	-1,24	52	3,78	3	0,01	45	2,29	9
Сибирский	1,69	5	-1,60	57	3,53	3	1,03	7	1,72	13
Дальневосточный	1,79	3	1,88	8	2,86	2	1,84	2	1,11	22

Примечание: Жирным курсивом выделены значения, попавшие в число трех старших максимумов в ряду наблюдений (ранги 1, 2, 3).

Далее в Докладе приводится текстовое описание особенностей температурного режима, с детализацией по сезонам и месяцам, сформированное на основе представленных выше оценок (рис. 4.5, 4.6, табл. 4.2).

4.3.2. Тенденции современных изменений температуры воздуха на территории России

В среднем по территории России линейный тренд среднегодовой температуры, оцененный по данным за 1976–2011 гг., составляет $+0,44$ °C/10 лет.

На рис. 4.7 представлено пространственное распределение коэффициентов линейных трендов температуры воздуха на территории России за 1976–2011 гг. Оценки получены по стационарным временным рядам средних годовых и сезонных аномалий температуры методом наименьших квадратов и выражены в градусах за десятилетие (°C/10 лет). Напомним, что коэффициенты тренда характеризуют среднюю скорость линейных изменений температуры на рассматриваемом отрезке времени.

Общая картина изменения температуры за период 1976–2011 гг. (рис. 4.7) указывает на продолжающуюся тенденцию к потеплению на всей территории России в среднем за год и практически повторяет картину трендов за 1976–2010 гг. Однако в сезонных распределениях есть определенные различия. Важными сезонными особенностями современных изменений температуры на рис. 4.7 представляются: тенденция к уменьшению температуры зимой на Чукотке (до $-0,5$ °C/10 лет) и в Западной Сибири (до $-0,3$ °C/10 лет) и обширная область отсутствия трендов в Западно-Сибирской низменности летом (в пределах $\pm 0,1$ °C/10 лет).

На рис. 4.8 показаны изменения оценок тренда зимних температур в динамике от 2009 к 2011 году (для наглядности на рисунке представлена вся постсоветская территория). За счет двух последних холодных зим общая картина представленных локальных тенденций несколько меняется (область похолодания на Чукотке несколько смещается от побережья Восточно-Сибирского моря и слабеет, а в Западной Сибири, напротив, похолодание становится заметнее), но для сколько-нибудь уверенных выводов относительно реальности этих изменений необходим более длительный период времени.

Региональные оценки трендов, полученные по временным рядам регионально осредненных аномалий температуры, приведены в табл. 4.3 для всех рассматриваемых регионов (территория РФ, физико-

географические регионы, федеральные округа Российской Федерации), а сами временные ряды приведены на рис. 4.4 (для России в целом) и 4.9, 4.10 (для регионов). На всех временных рядах показан линейный тренд за 1976–2011 гг.

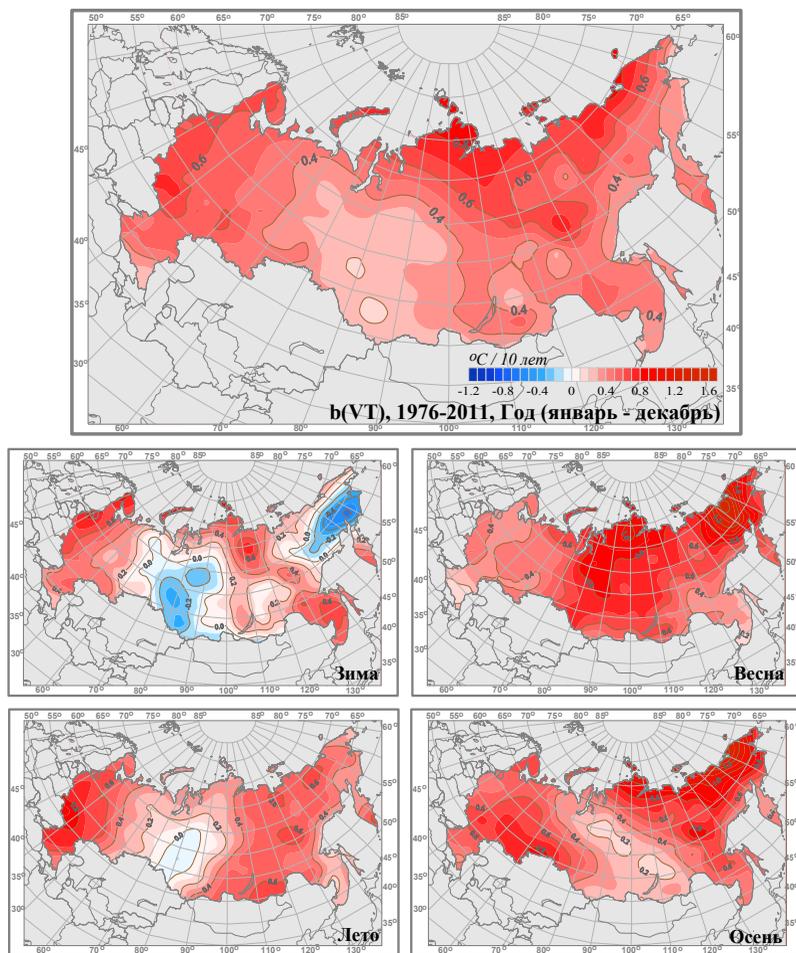


Рисунок 4.7 – Распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой и средних сезонных значений температуры приземного воздуха на территории России за период 1976–2011 гг. (°C/10 лет)

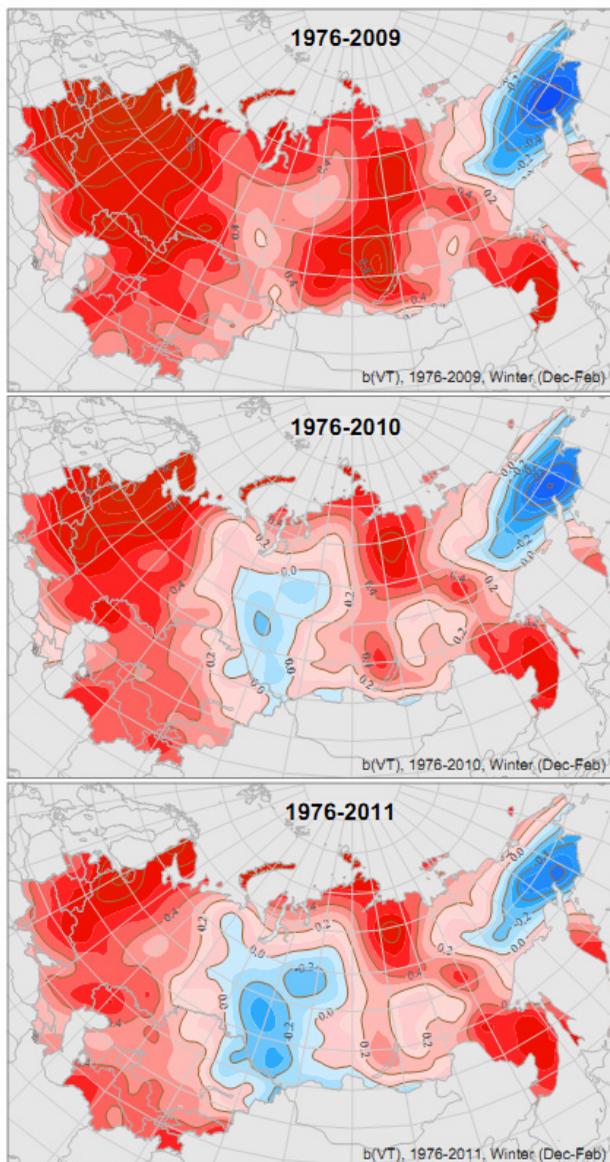


Таблица 4.3

Оценки линейного тренда пространственно-средней температуры за 1976–2011 гг., в среднем за год и по сезонам, для территории России, ее регионов и федеральных округов: *b* – коэффициент линейного тренда (°C/10 лет), *D* – вклад тренда в дисперсию (%)

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	<i>b</i>	<i>D</i>								
Российская Федерация (РФ)	0,44	36	0,20	2	0,57	29	0,43	56	0,53	25
Физико-географические регионы России										
Европейская часть РФ	0,53	35	0,45	5	0,38	13	0,58	32	0,60	25
Западная Сибирь	0,28	10	-0,12	0	0,64	19	0,09	1	0,45	9
Средняя Сибирь	0,46	21	0,19	1	0,70	22	0,43	31	0,42	7
Прибайкалье и Забайкалье	0,38	24	0,13	1	0,58	19	0,56	44	0,28	6
Приамурье и Приморье	0,42	42	0,54	14	0,29	8	0,34	26	0,51	30
Восточная Сибирь	0,51	39	0,00	0	0,79	32	0,50	46	0,77	37
Федеральные округа РФ										
Северо-Западный	0,53	28	0,53	4	0,41	11	0,50	32	0,55	16
Центральный	0,62	37	0,56	6	0,43	12	0,77	33	0,60	22
Приволжский	0,50	28	0,33	2	0,40	10	0,51	16	0,69	24
Южный	0,54	33	0,47	7	0,30	7	0,75	37	0,59	22
Северо-Кавказский	0,39	26	0,36	9	0,19	6	0,53	30	0,45	15
Уральский	0,33	12	0,01	0	0,60	14	0,16	2	0,47	7
Сибирский	0,33	15	-0,01	0	0,68	24	0,32	28	0,33	6
Дальневосточный	0,50	45	0,23	5	0,62	27	0,47	54	0,66	36

Данные табл. 4.3, иллюстрируемые рис. 4.9–4.10, подтверждают тенденцию к росту среднегодовой температуры на всей территории России: во всех рассматриваемых регионах линейный тренд среднегодовой температуры положительный. Регионы наиболее интенсивного потепления – европейская часть России (0,53 °C/10 лет) и Восточная Сибирь (0,51 °C/10 лет). Наиболее интенсивное потепление наблюдается весной (особенно в Сибири), а также осенью в Восточной Сибири: тренд региональной средней +0,79 °C/10 лет и достигает +1,2 °C/10 лет в районе Колымской низменности. Летом наибольшая

скорость потепления отмечается в регионе европейской части России (+0,58 °C/10 лет). Зимой наблюдается отрицательный тренд температуры на Чукотке (до -0,6 °C/10 лет). Слабая тенденция к уменьшению температуры в Западной Сибири проявляется зимой (до -0,2 °C/10 лет) и незначительная – летом (до -0,1 °C/10 лет).

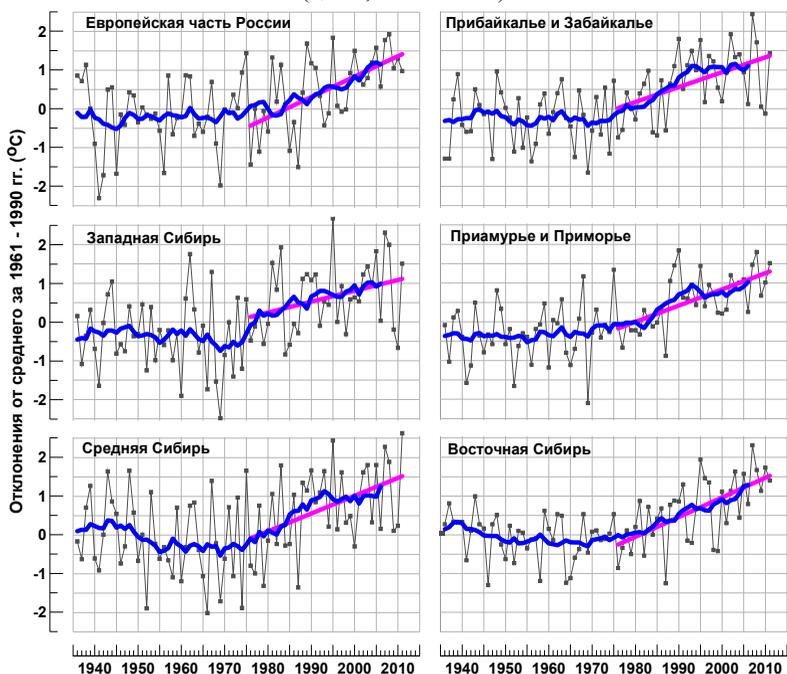


Рисунок 4.9 – Средние годовые аномалии температуры приземного воздуха (°C) для регионов России за 1936–2011 гг. Усл. обозначения см. на рис. 4.4

Выводы

В целом для России 2011 год был теплым – средне-годовая аномалия температуры составила +1,55 °C. Год вошел в пять самых теплых лет за период инструментальных наблюдений, повторив температуру 2005 г. Более теплыми были рекордный 2007 год (+2,08 °C) и следующие за ним 1995 и 2008 гг. (соответственно, аномалии +2,05 и +1,86 °C).

Основными сезонными особенностями были теплые весна (ранг 2) и лето (ранг 3) и холодная зима.

Весной область теплой аномалии с центром на севере Сибири (где величина аномалии превышала $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$) охватывала весь север и восточную часть страны. Теплыми были все месяцы сезона, особенно апрель.

Летом очаги тепла располагались в центре европейской части России и в Якутии; в регионе Приамурье и Приморье летняя температура перекрывала абсолютный максимум (с 1886 года) второй год подряд.

Зимой очаги холода (до $-3 \dots -4\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдались на севере европейской части России, юге Западной Сибири и в центре Средней Сибири. Вместе с исключительно холодной зимой предыдущего года, зима 2010/2011 гг. значительно повлияла на оценки локальных и региональных трендов зимнего сезона. Как и по оценкам 1976–2010 гг., тенденция к похолоданию на территории России обнаруживается в зимний период в северо-восточном регионе (на Чукотке до $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и в Западной Сибири (до $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$).

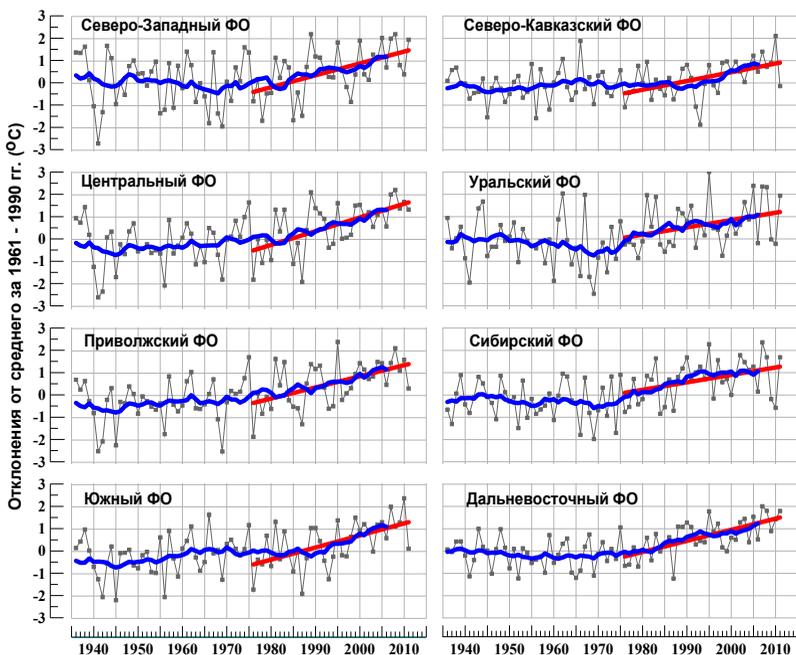


Рисунок 4.10 – См. рис. 4.9, но для федеральных округов РФ

5. ОБНОВЛЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РОССИИ (наблюдаемый климат)

Выше отмечалось, что в соответствии с рекомендациями ВМО, аномалии на сегодняшний день рассчитываются относительно норм 1961–1990 гг., а новые нормы предложено ввести в международную практику лишь после 2020 г. (средние за 1991–2020 гг.).

Действующие климатические нормы для территории России (за 1961–1990 гг.) были многократно описаны в научных публикациях и представлены в климатических справочниках. В частности, стационарные нормы приведены в (Научно-прикладной, 2011), а картированные поля норм – в (Оценочный доклад, 2008). Однако в условиях меняющегося климата (что на сегодняшний день не вызывает сомнений) применение этих норм на практике, особенно для оценки успешности месячных и сезонных прогнозов, становится крайне нецелесообразно.

Ниже предлагается комплект обновленных оценок базовых климатических характеристик на территории России, полученных по данным стационарных наблюдений о среднемесячной температуре приземного воздуха за период 1981–2010 гг. Комплект включает поля многолетних средних (норм) и стандартных отклонений для каждого месяца и в среднем за год (рис. 5.1–5.13).

Дополнительно приведены обновленные (с учетом данных по 2011 г.) оценки текущих тенденций в изменении температуры на территории России для каждого календарного месяца (5.14–5.19). Годовые и сезонные поля таких оценок приведены в предыдущем разделе.

Для полноты картины поля статистик не ограничены государственными границами России, а охватывают территорию, освещенную данными станций в базовом архиве мониторинга климата ИГКЭ (т. е. территорию бывшего СССР).

5.1. Пространственные распределения многолетних средних и стандартных отклонений (1981–2010 гг.)

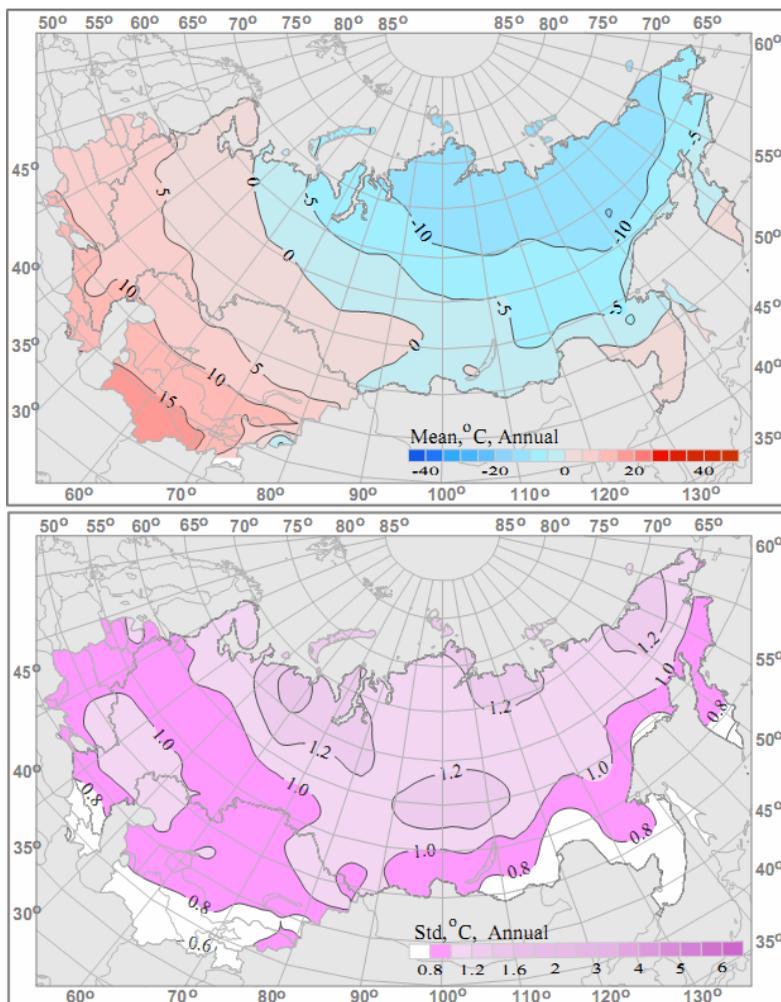


Рисунок 5.1. – Поля многолетних средних (вверху) и стандартных отклонений (внизу) среднегодовой температуры приземного воздуха на территории России и соседних государств

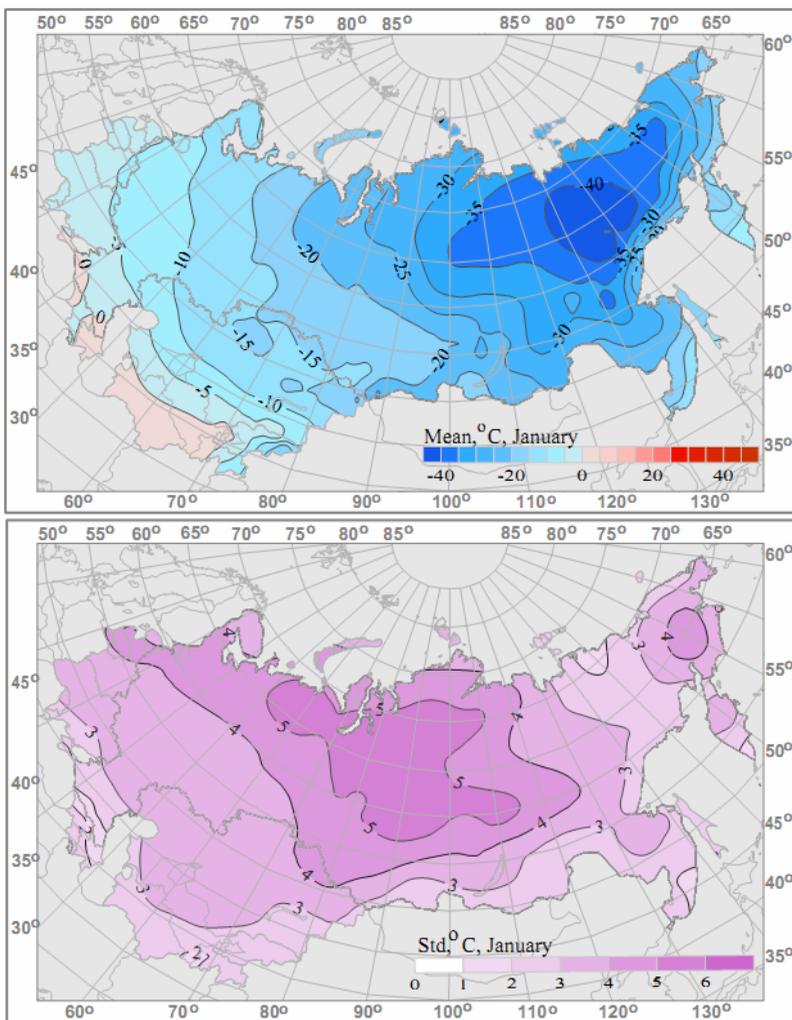


Рисунок 5.2 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры января

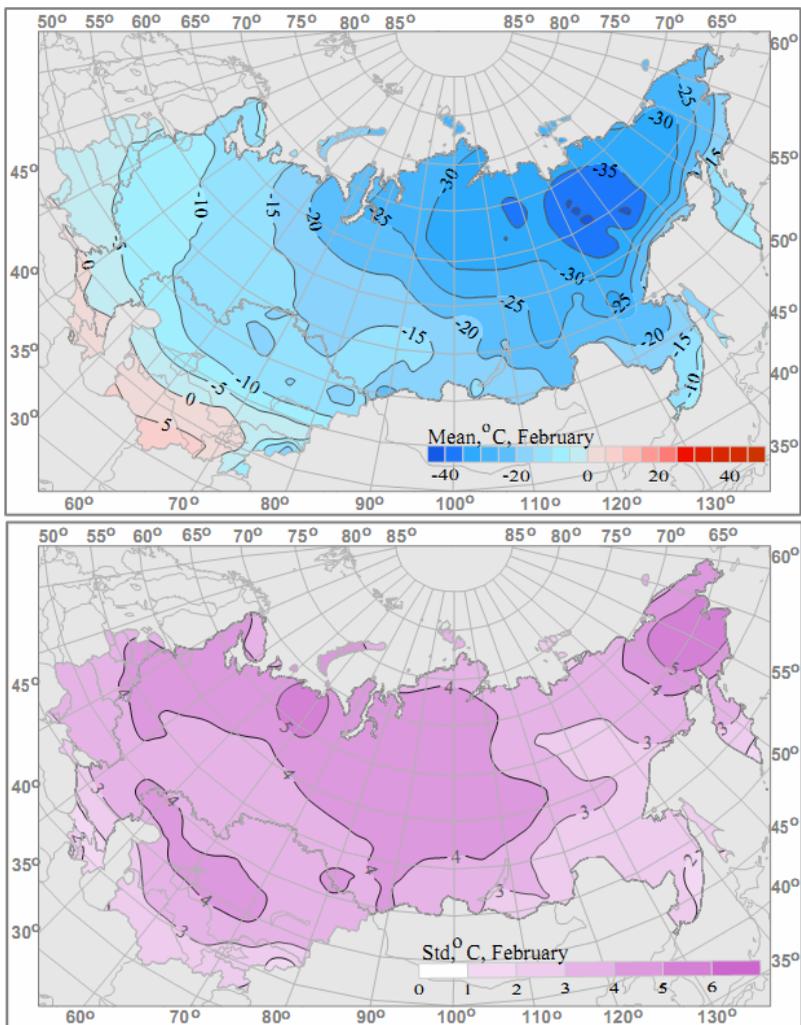


Рисунок 5.3 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры февраля

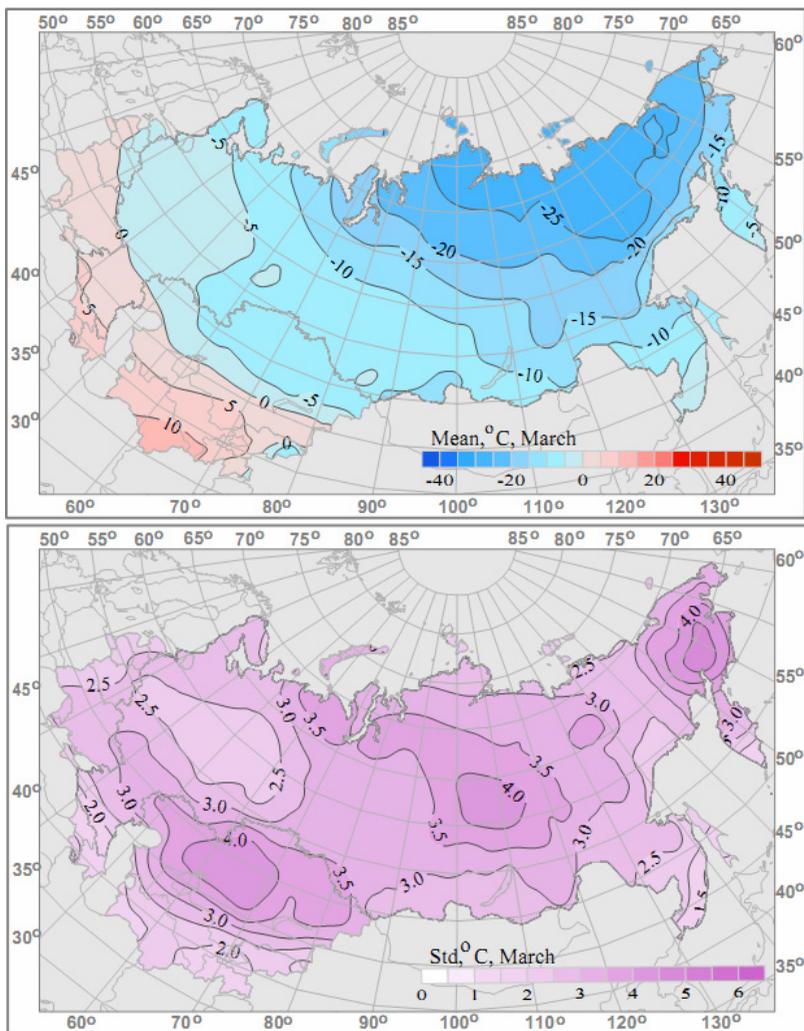


Рисунок 5.4 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры марта

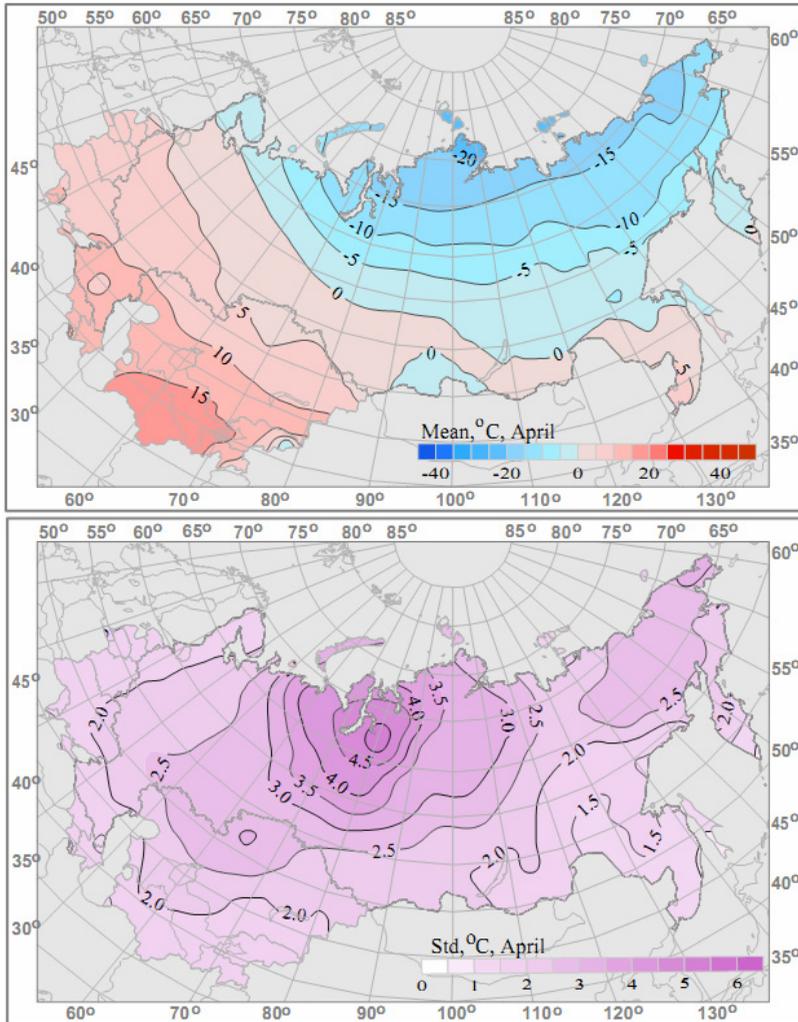


Рисунок 5.5 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры апреля

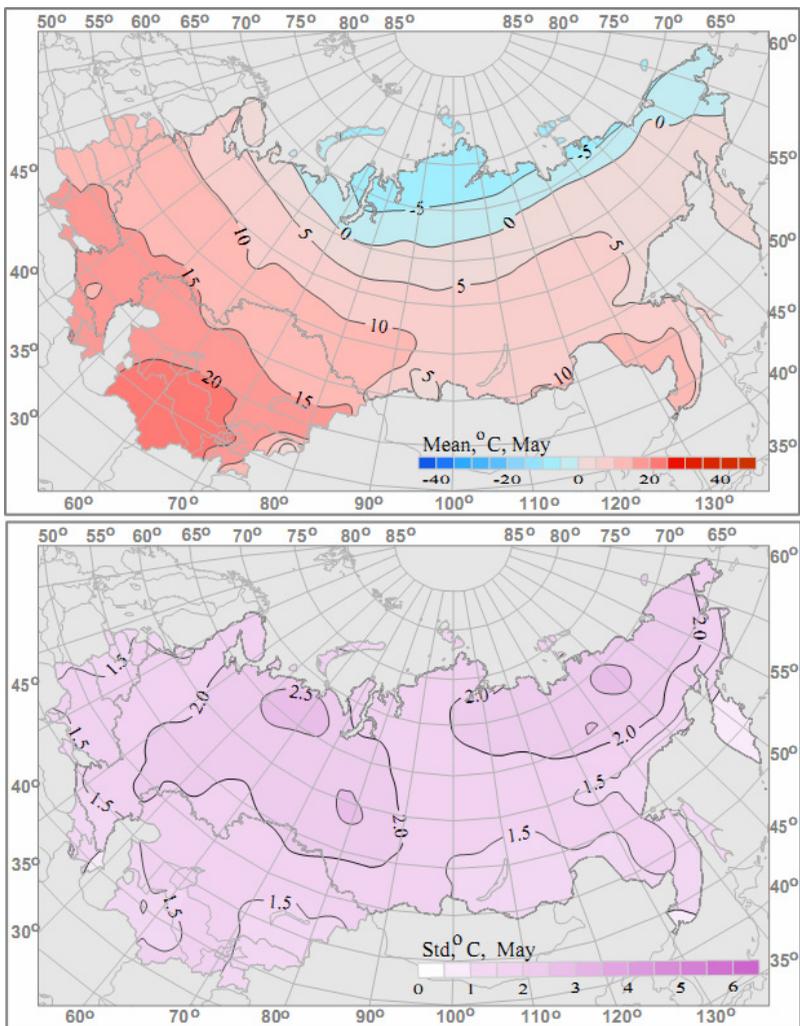


Рисунок 5.6 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры мая

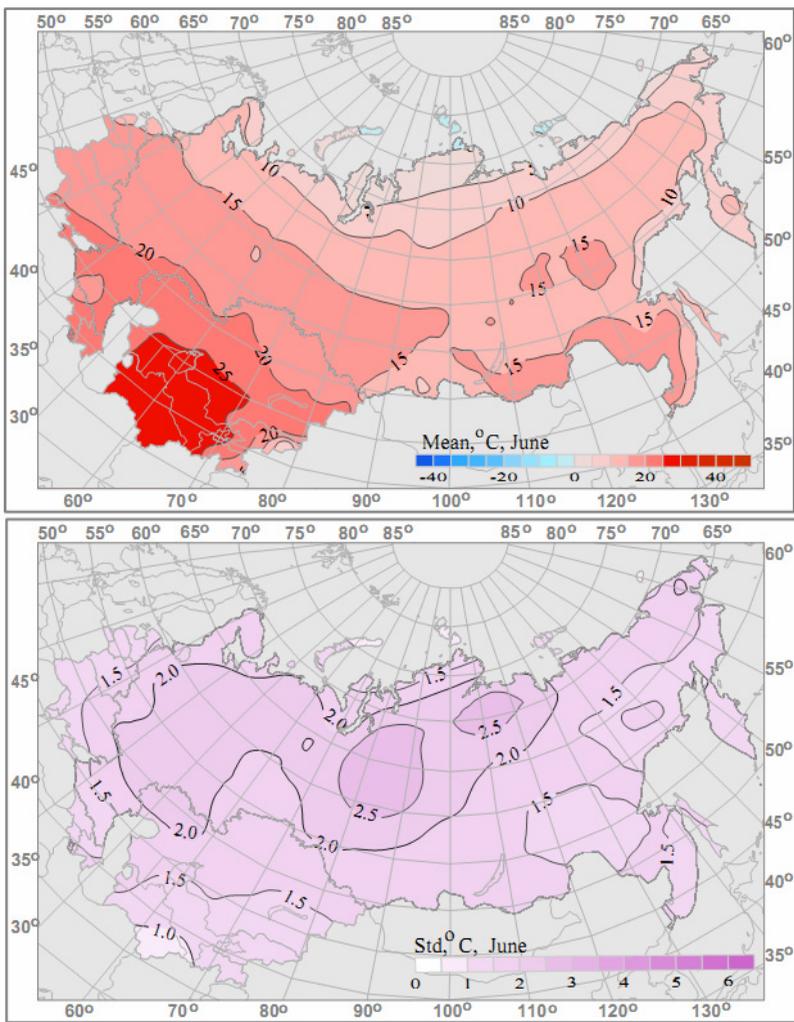


Рисунок 5.7 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры июня

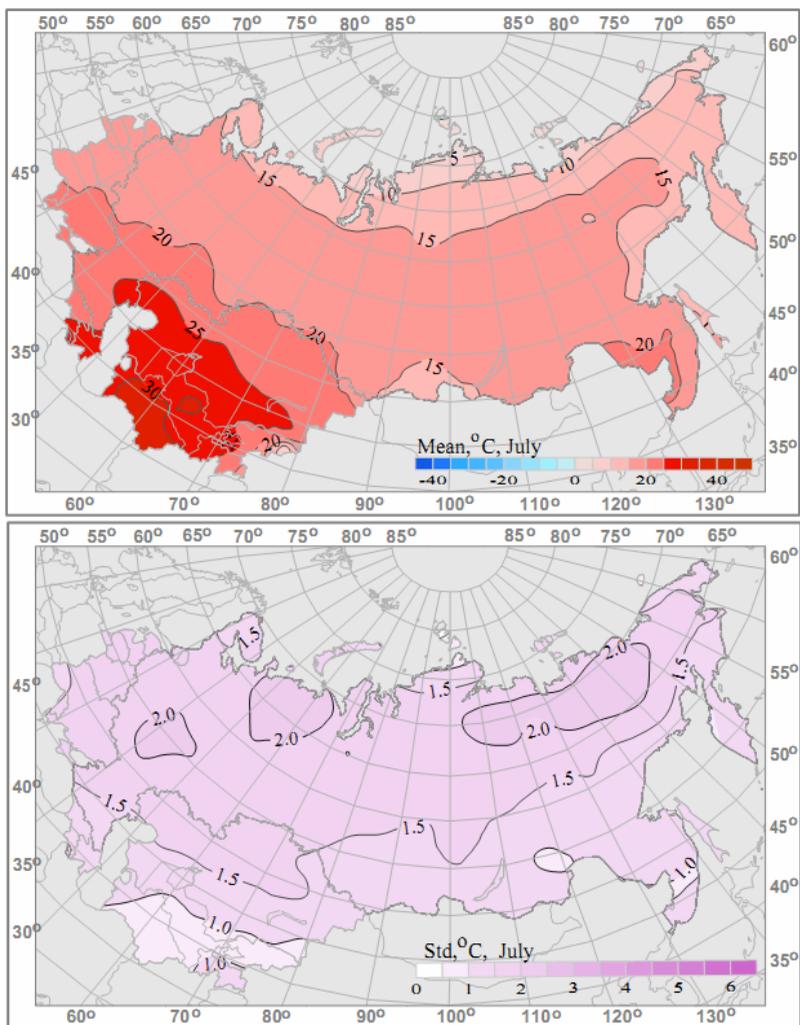


Рисунок 5.8 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры июля

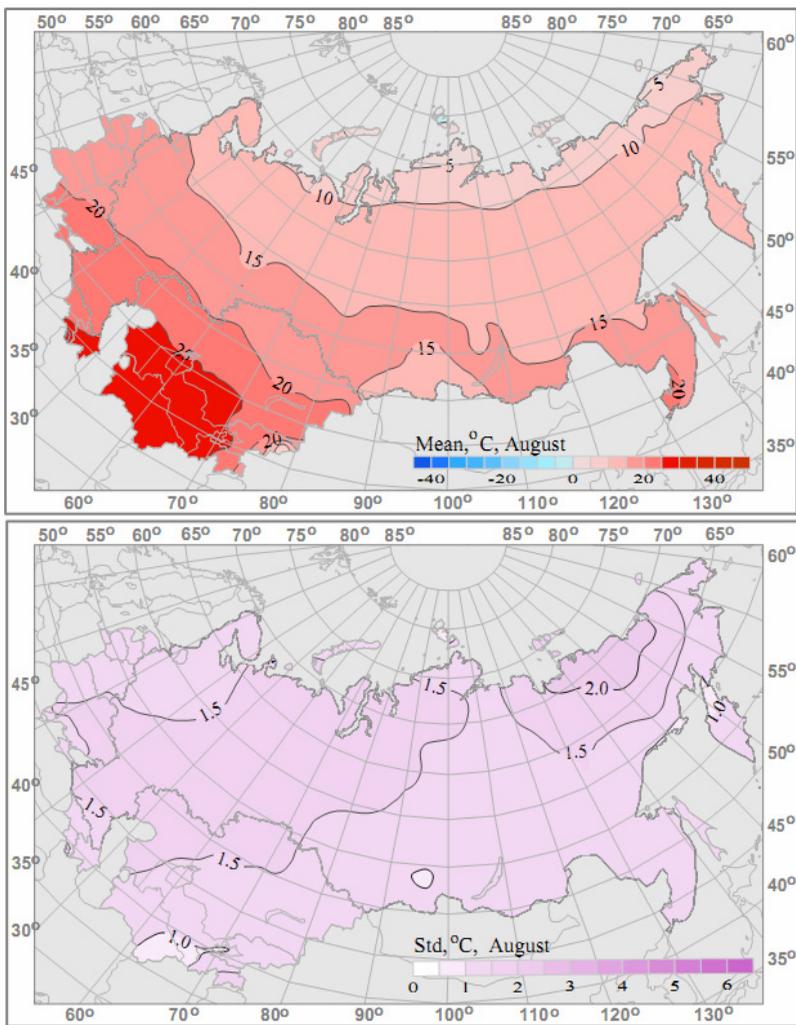


Рисунок 5.9 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры августа

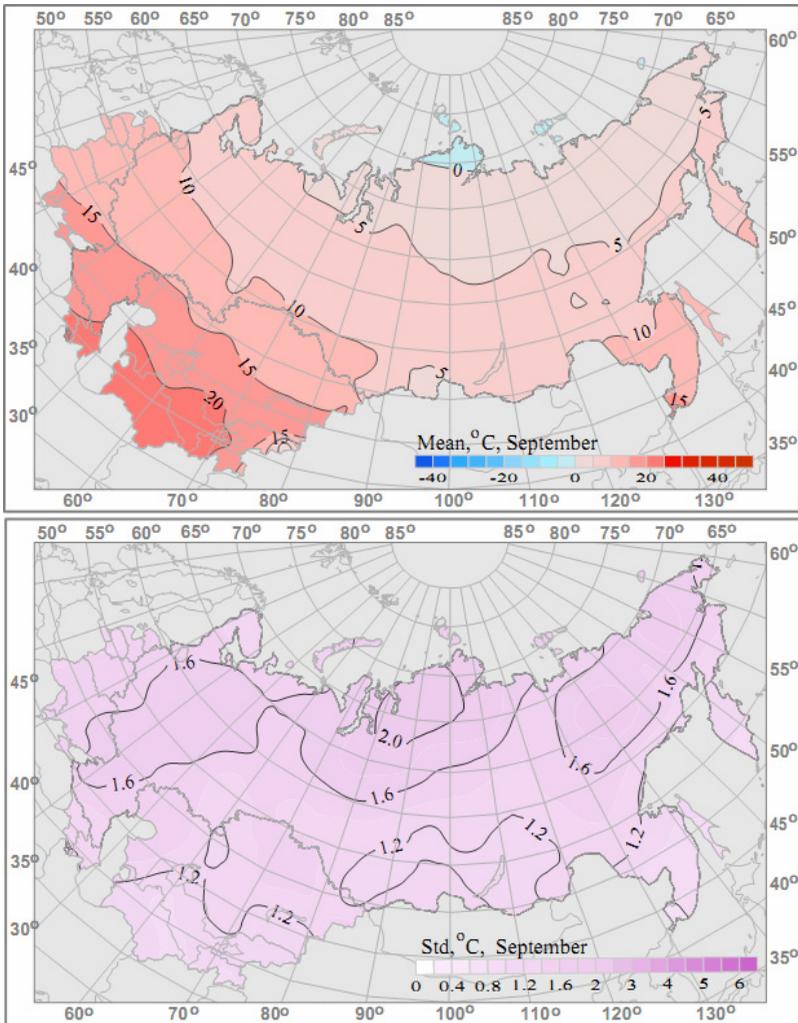


Рисунок 5.10 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры сентября

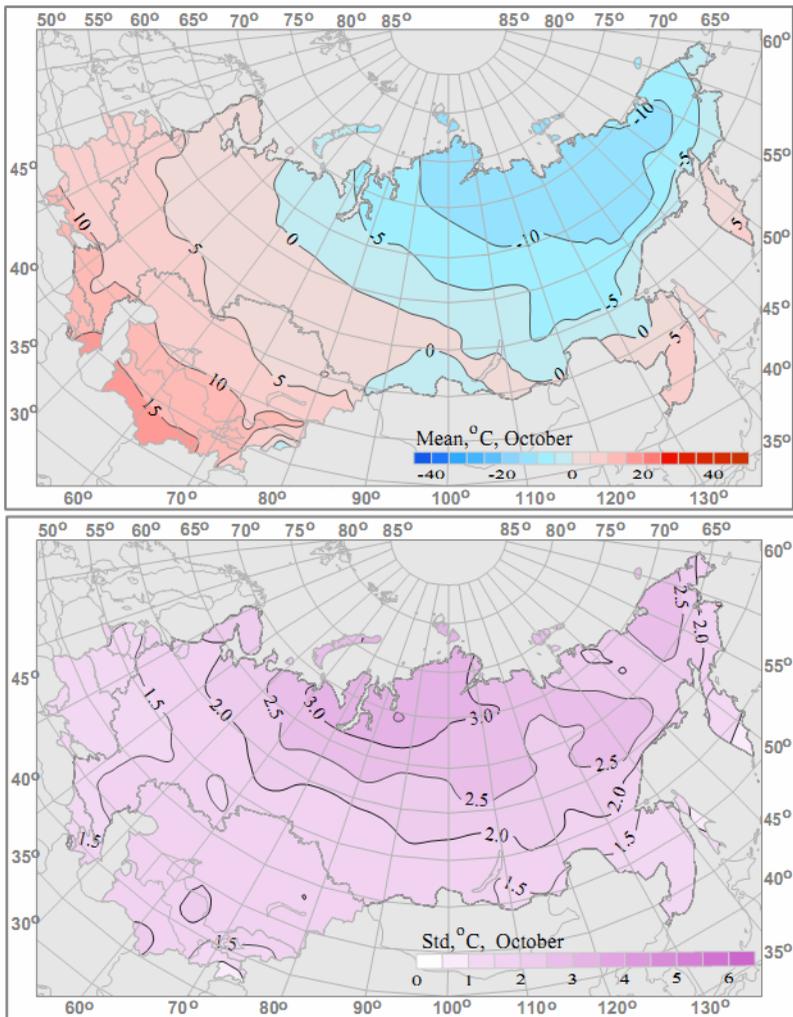


Рисунок 5.11 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры октября

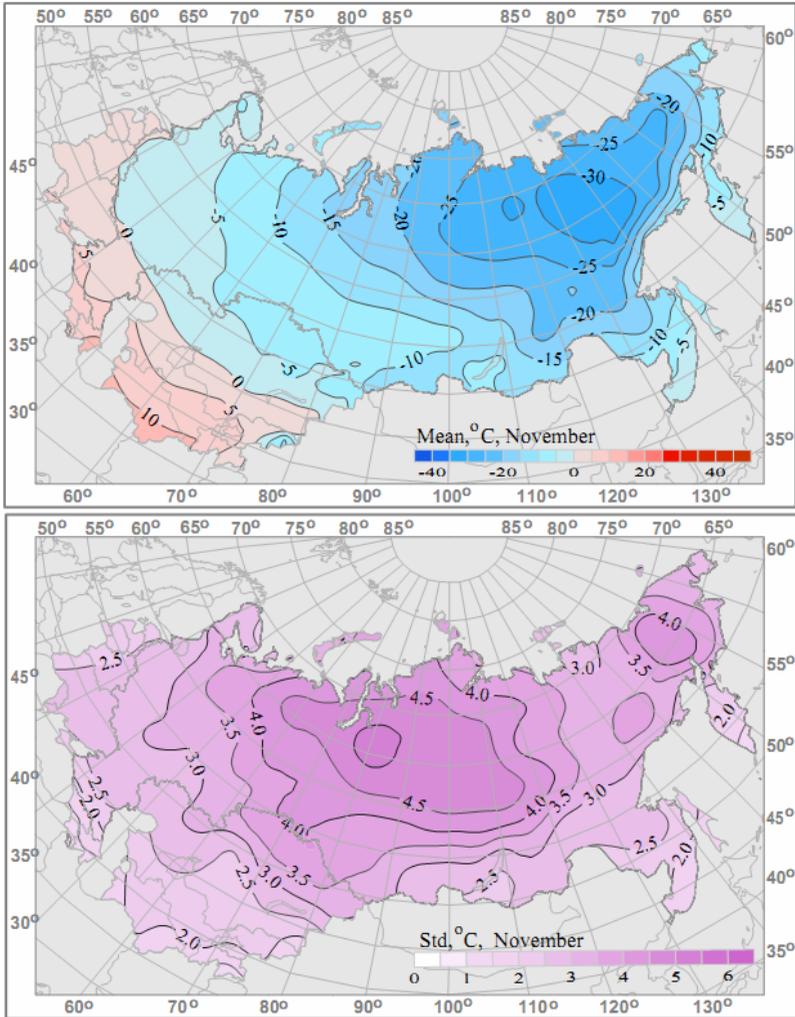


Рисунок 5.12 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры ноября

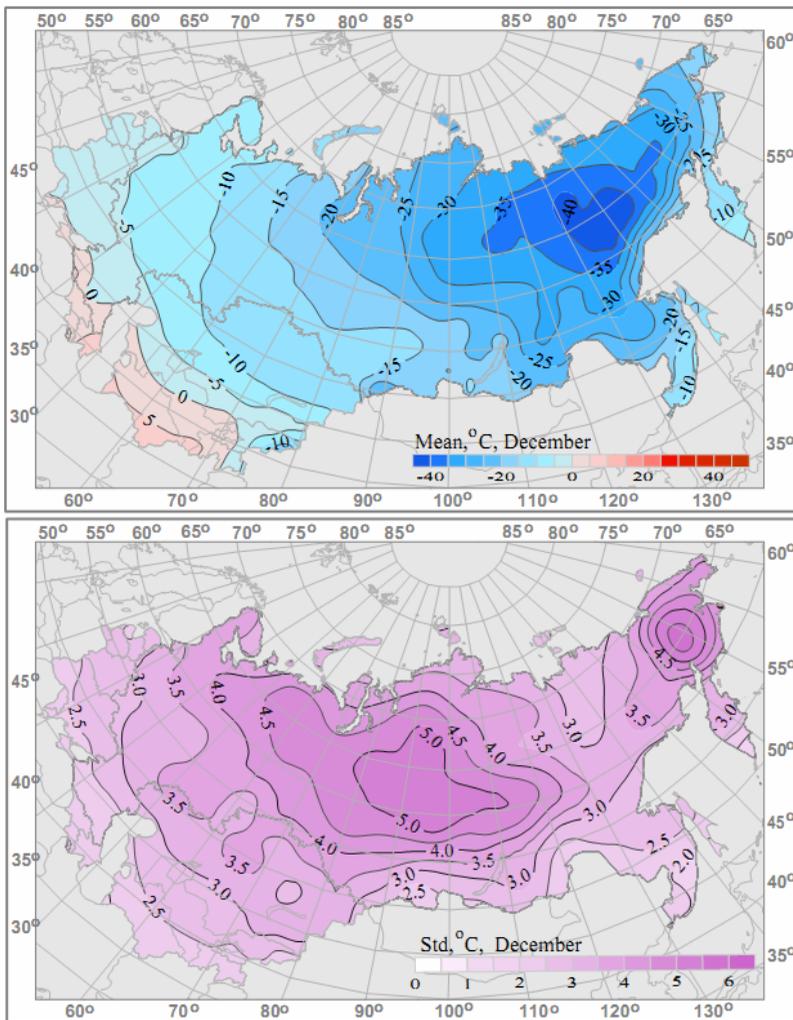


Рисунок 5.13 – См. рис. 5.1, но для среднемесячной температуры декабря

5.2. Тенденции современных изменений температуры приземного воздуха по данным наблюдений (1976–2011 гг.)

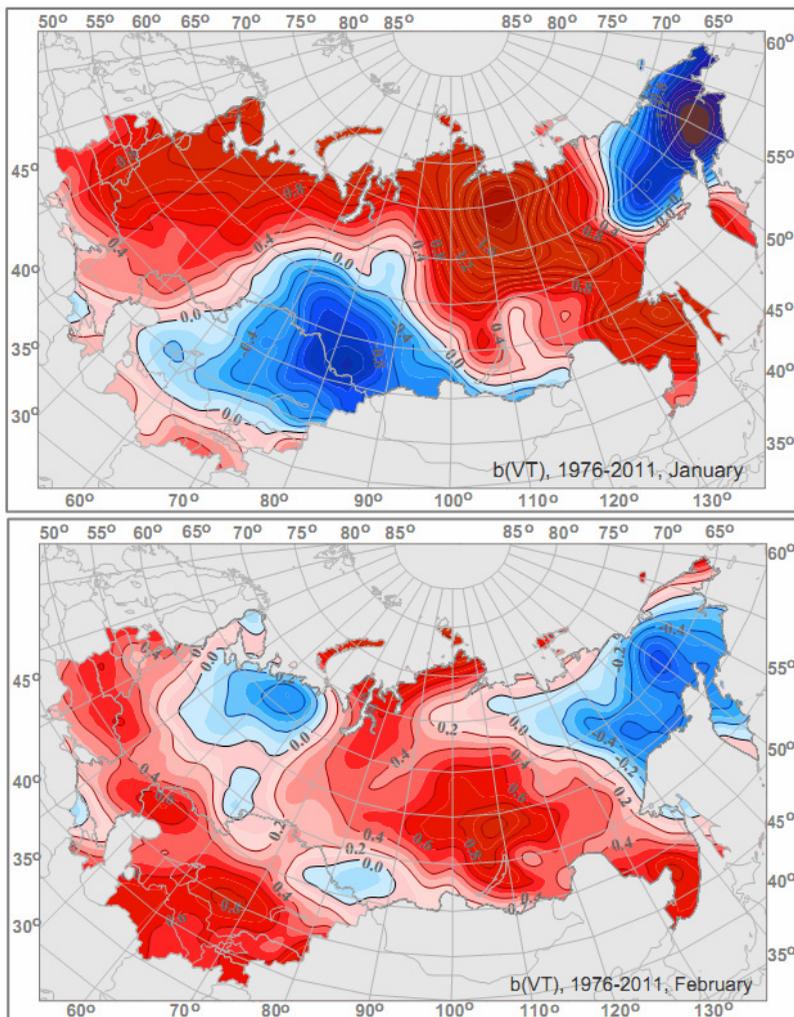


Рисунок 5.14 – Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда в изменении среднемесячной температуры приземного воздуха на территории России в январе (сверху) и феврале (внизу) 1976–2011 гг.

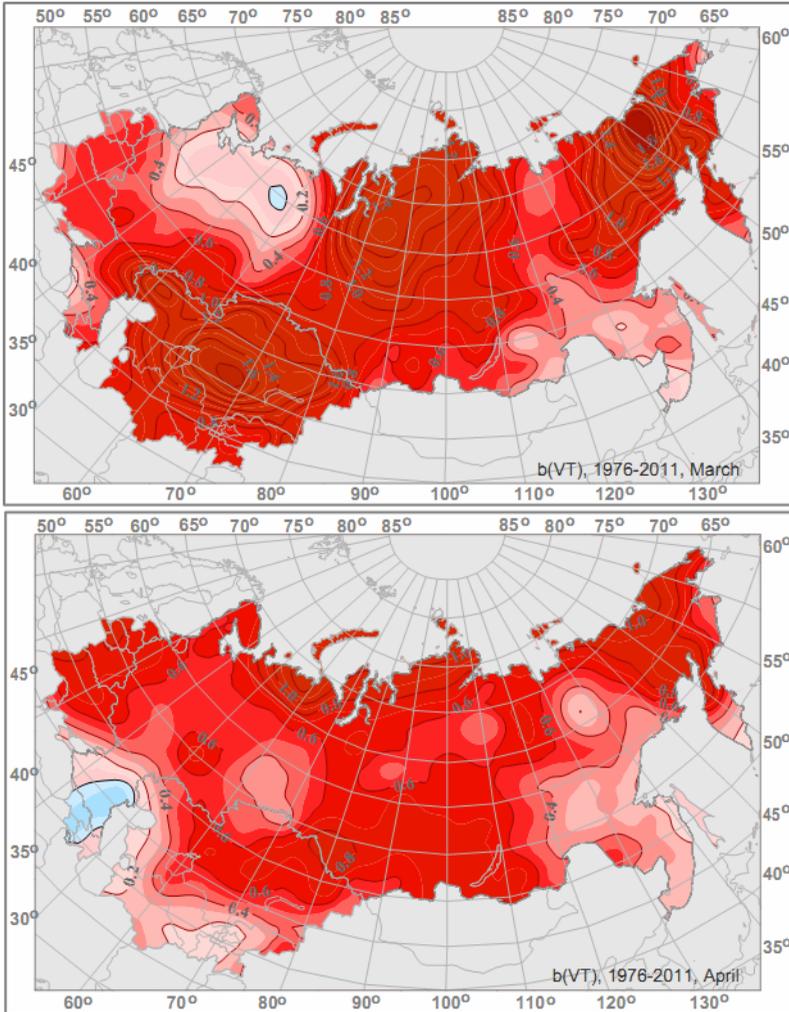


Рисунок 5.15 – См. рис. 5.14, но для марта (вверху) и апреля (внизу)

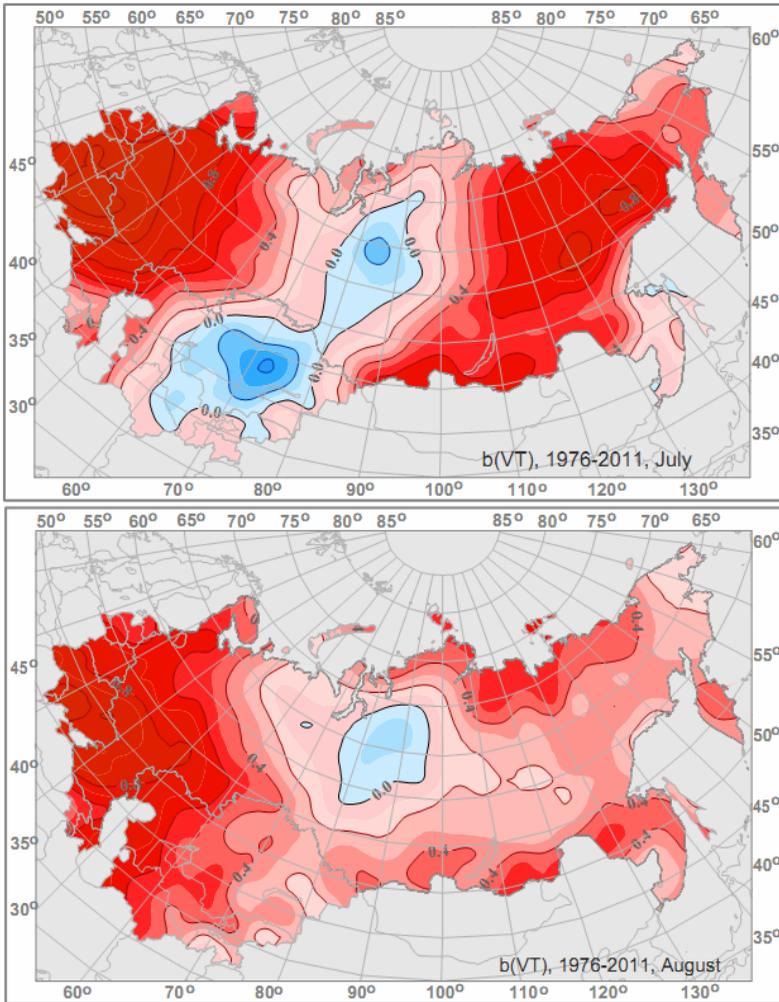


Рисунок 5.17 – См. рис. 5.14, но для июля (вверху) и августа (внизу)

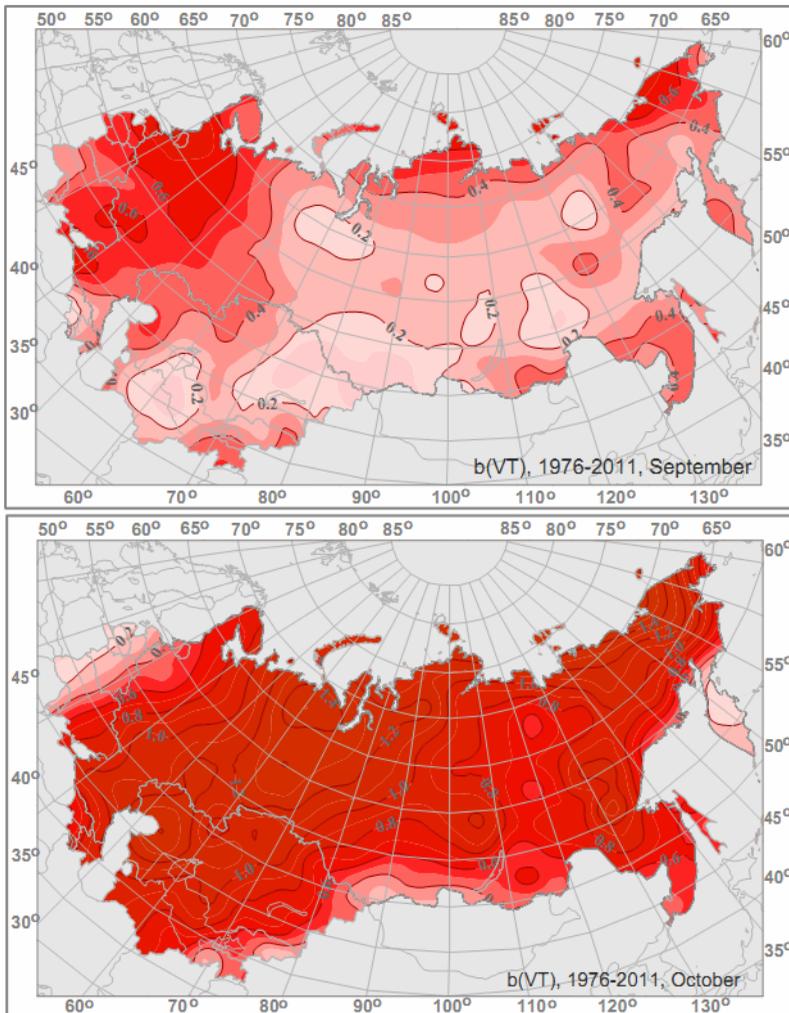


Рисунок 5.18 – См. рис. 5.14, но для сентября (вверху) и октября (внизу)

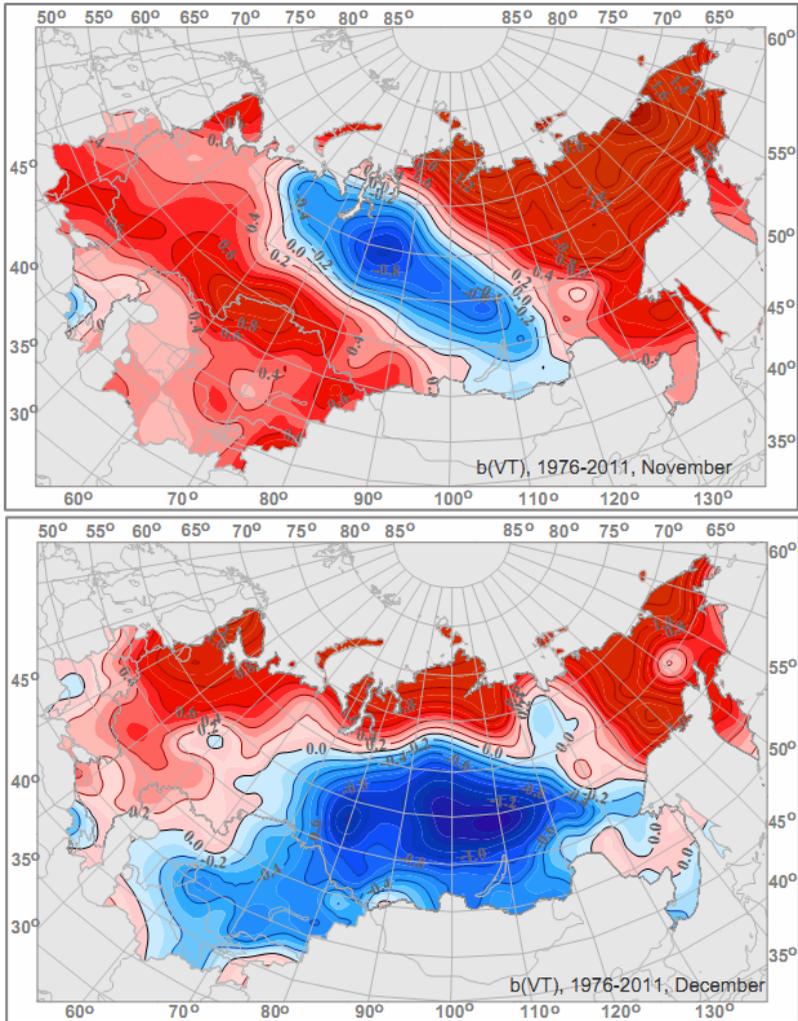


Рисунок 5.19 – См. рис. 5.14, но для ноября (вверху) и декабря (внизу)

6. О ВОЗМОЖНОМ ВКЛАДЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЭКСТРЕМУМОВ

Анализ возможной связи региональных экстремумов температурного режима с глобальным потеплением приводится здесь в связи с уникально жарким летним сезоном 2010 года в России.

Практически во всех публикациях, посвященных этому событию, в качестве непосредственной причины указывается обширный блокирующий антициклон в европейской части России, который затем тщательно препарируется с привлечением всей доступной информации об особенностях циркуляции атмосферы в этот период и в сравнении с ранее наблюдавшимися аналогичными аномалиями. В работе (Шакина, 2010) представлен обширный аналитический обзор процессов блокирования и высказано мнение, что в данном случае причину столь аномальной длительности «блока» следует искать в его «энергетике», с учетом «энергообмена между возмущениями синоптического и планетарного масштаба».

Авторы (Черенкова, Кононова, 2012) считают причиной столь длительной летней аномалии 2010 г. отмечающееся в последнее время преобладание меридиональных процессов обеих групп – северной и южной. При такой циркуляции антициклон на юге ЕТР соединяется с арктическим антициклоном и «подпитывается» его сухим арктическим воздухом. В работе (Мещерская и др., 2011) метеорологические условия летнего сезона 2010 г. дополнительно анализируются в контексте характеристик засух и засушливых явлений, наблюдавшихся на ЕТР за весь период наблюдений. Авторы пришли к выводу, что вероятность повторения аналогичной засухи на ЕТР «выше случайной лишь через 5–6 до 10 лет».

В работе (Dole et al., 2011) в качестве возможных причин летней аномалии 2010 г. рассмотрены температура поверхности океанов, площадь морского льда и атмосферная концентрация парниковых газов. Вывод сделан в пользу внутренней климатической изменчивости атмосферы.

В этом отношении интересным представляется анализ, представленный в работе (Trenberth et al., 2011). Гипотеза авторов состоит

в том, что естественная изменчивость (ENSO) и глобальное потепление совместно приводят к высоким аномалиям температуры поверхности океана (ТПО), которые создают специфическую циркуляцию в атмосфере и через систему телеконнекций благоприятствуют в некоторых регионах активному развитию стационарирующих (устойчивых) блокирующих антициклонов. В данном случае «ближайшей причиной стационарирования и повышенной интенсивности волны тепла в России, по-видимому, было одновременное осуществление высокого уровня ТПО в тропической Атлантике (с сопутствующей волной Россби, продвигающейся через Атлантику) и на севере Индийского океана (с развитой азиатской муссонной циркуляцией)». Эту же причину авторы связывают с другими климатическими экстремумами 2010 года: аномально активный сезон ураганов в Атлантике, исключительные дожди в Колумбии, засуха на Амазонке и др.

Таким образом, по мнению авторов (Trenberth et al., 2011), высокие положительные аномалии ТПО сразу в двух океанах (север Индийского и тропики Атлантического), будучи внешним фактором по отношению к атмосфере, вызвали серию крупных климатических экстремумов в разных регионах мира. При этом высокий уровень ТПО создан совместно глобальным потеплением и естественной изменчивостью (Эль-Ниньо) при доминирующем вкладе последней.

Представляется, что полноценный ответ на вопрос о причинах этого уникального летнего сезона еще будет дан после всестороннего эмпирического анализа всех доступных данных (для формулирования гипотетических причин) и специальных модельных экспериментов с более совершенными гидродинамическими моделями (для проверки сформулированных гипотез).

Оставляя в стороне вопрос о причинах этого явления, рассмотрим некоторые относящиеся к нему фактографические данные.

На рис. 6.1 показаны изменения *сезонных летних аномалий* температуры воздуха, осредненных по территории Северного полушария и России в течение 1886–2010 гг.

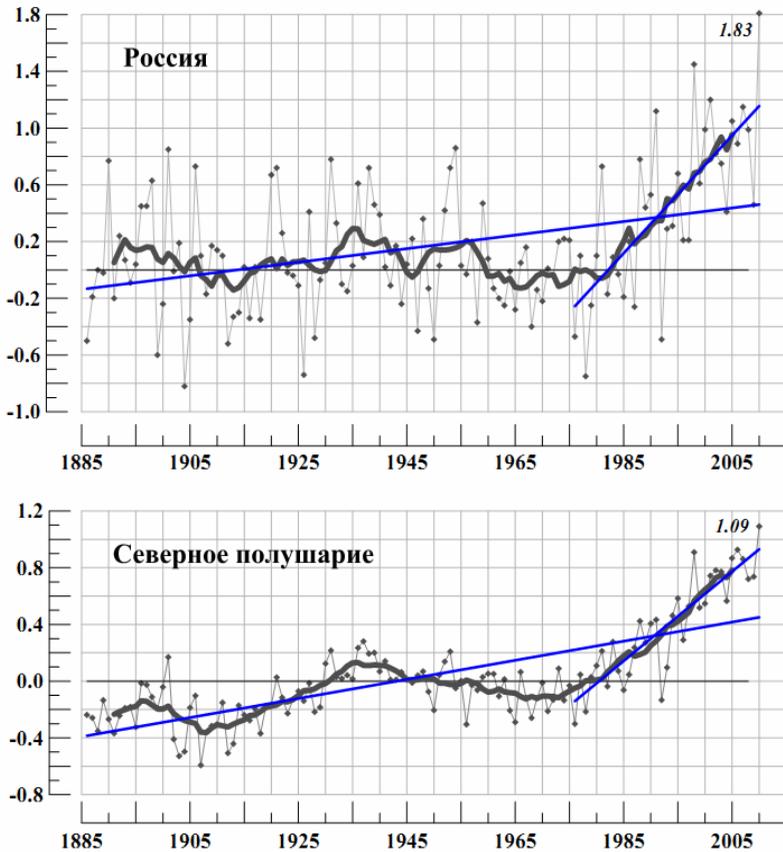


Рисунок 6.1 — Ход сезонных летних аномалий температуры, осредненных по территории России (данные ИГКЭ) и над сушей Северного полушария (данные Метеослужбы Великобритании). Сглаженный ход получен 11-летним скользящим осреднением. Линейные тренды приведены за 1886–2010 и 1976–2010 гг.

Распространено мнение, что, поскольку интенсивность глобального потепления для земного шара оценивается трендом всего около 1 градуса за 100 лет, оно не может иметь существенного значения для развития индивидуальных региональных процессов. Однако следует иметь в виду, что региональные изменения температуры существенно неоднородны во времени и меняются от региона к региону. Можно видеть, что интенсивность потепления за последние 35 лет

существенно выше, чем в целом за 100 лет, и что в 2010 году на территории России был достигнут абсолютный максимум летних температур за весь период инструментальных наблюдений. Жаркое лето в России отмечается как одна из самых крупных в мире климатических аномалий 2010 года.

Наблюдаемая летом 2010 года аномалия температурного режима относится к так называемым «волнам тепла» (синоним – «теплое вторжение»), под которыми понимается «значительное потепление, распространяющееся в определенном направлении, связанное с адвекцией теплой массы» (Хромов, Мамонтова, 1974). Длительные волны тепла, как правило, связаны с малоподвижными (стационарными) антициклонами, блокирующими процессы западного переноса (перемещение подвижных циклонов и антициклонов с запада на восток).

О пространственных масштабах и интенсивности летней жары на территории России в 2010 г. дает представление поле аномалий температуры воздуха рассматриваемого летнего сезона на рис. 6.2. Выделяются две области необыкновенной жары – на Европейской территории и в Восточной Сибири – и разделяющая их область небольших отрицательных аномалий на территории Западносибирской низменности.

Район максимальной жары охватывает европейскую часть России (и примыкающие восточные районы Украины, Беларуси и Балтии). Здесь сезонные аномалии температуры превысили $+6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в июле (самый жаркий месяц сезона) аномалия температуры на отдельных станциях достигла $+8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дополнительно на рисунке точками указаны станции, на которых летом 2010 года были зафиксированы новые максимумы сезонных температур. Таких станций на Европейской территории России оказалось 54.

Эпицентром летней жары в России следует считать, по-видимому, центр и юг Европейской территории Российской Федерации в июне-июле. Здесь жара началась в мае и продолжалась до августа, но особенно интенсивная жара началась с третьей декады июня (особенно в ЦЧО), когда среднесуточные температуры воздуха превышали климатическую норму на $7\text{--}11\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальные температуры в дневные часы достигали $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более.

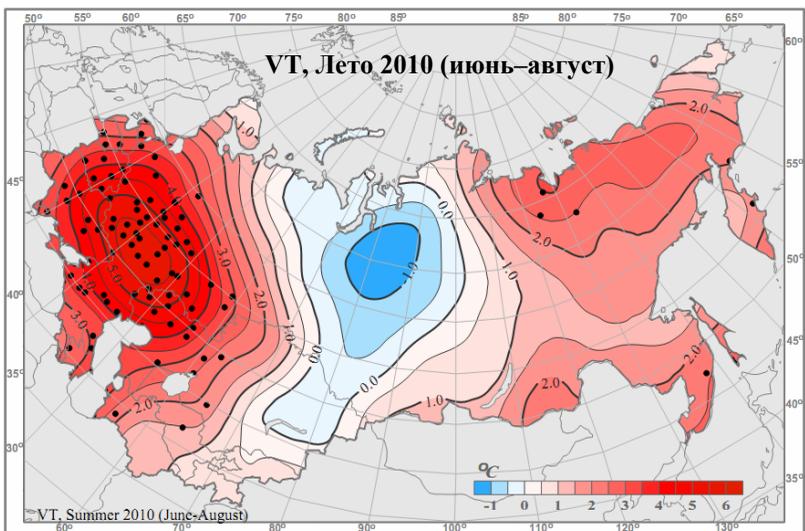


Рисунок 6.2 – Распределение сезонных аномалий температуры приземного воздуха на территории СНГ летом 2010 года (отклонения от средних за 1961–1990 гг.). Точками показаны станции, на которых зафиксированы рекордно высокие значения сезонных температур (наблюдались впервые с 1936 г.)

Календарные особенности температурных условий летнего сезона 2010 года иллюстрируются ходом суточных температур в Москве на рис. 6.3. На том же рисунке (внизу) аналогичный ход температуры приведен для 1972 года, также отмеченного жарой, засухой и лесными пожарами под Москвой.

На рисунках жирной кривой показан ход среднесуточной температуры с 31 марта по 25 сентября. Соответствующий суточный размах наблюдаемых температур показан вертикальными отрезками (от суточного минимума к суточному максимуму). Верхняя точечная кривая представляет сезонный ход абсолютных суточных максимумов 1961–1990 гг. (календарные «рекорды» базового периода). Наконец, тонкие серые кривые указывают сезонный ход календарных (за каждый день) 30-летних статистик 1961–1990 гг. – средних и границ 90 %-го доверительного интервала (т.е. 5 и 95 % квантили).

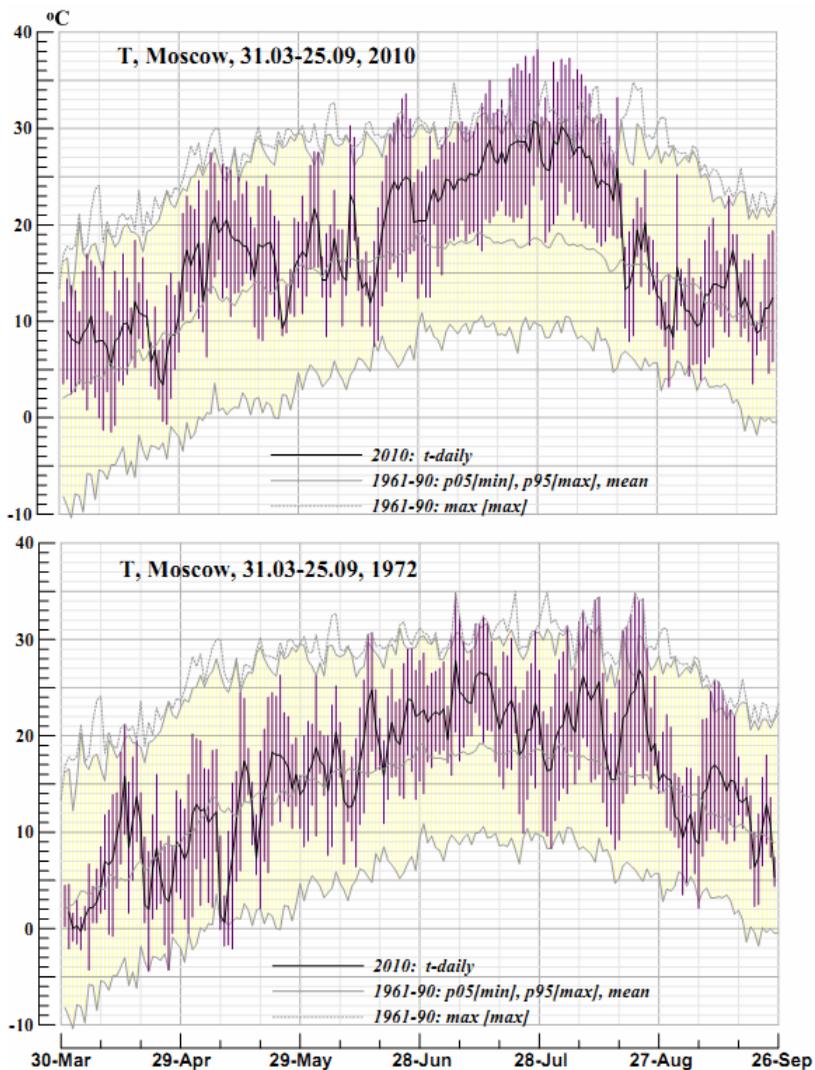


Рисунок 6.3 – Ход среднесуточной температуры в Москве с 31 марта по 25 сентября 2010 г. (вверху) и 1972 г. (внизу) на фоне сезонного хода статистических характеристик базового периода 1961–1990 гг. Условные обозначения см. в тексте и легенде

Напомним, что в Москве средняя за 1961–1990 гг. июльская температура (норма) составляет $+18,2$ °С.

В июле 2010 г. впервые за период наблюдений (с конца XIX столетия) среднемесячная температура достигла отметки $+26,0$ °С (т.е. аномалия равна $+7,8$ °С), перебив предыдущий «рекорд» на $2,7$ °С ($+23,3$ °С в 1938 году).

Основное различие этих двух периодов жары состоит в том, что летом 2010 года жара была более интенсивной и устойчивой, без кратковременных отступлений. В период с 8 июля до 17 августа 2010 года (т.е. подряд 41 день) дневные температуры ежедневно оставались выше 95-го перцентиля. При этом с 14 июля по 10 августа (27 дней) они превышали также и календарные суточные максимумы 1961–1990 гг. с одним коротким перерывом на 3 дня с 29 по 31 июля. Наконец, 28 июля 2010 г. в Москве зафиксирован новый абсолютный максимум температуры $38,2$ °С – прежний максимум $35,0$ °С наблюдался 21.07.1981 г. (по некоторым источникам $+35,3$ °С). Для сравнения отметим, что максимальная длительность выброса дневных температур за 95-й перцентиль в 1972 г. была только 8 дней, а выбросов за календарные максимумы не было вовсе.

Отметим также, что в 2010 году были зафиксированы новые рекорды среднемесячных температур в июне на 10 станциях, в июле – на 56, а в августе – на 27 станциях.

Возвращаясь к вопросу о потенциальном вкладе глобального потепления в генезис аномалий, подобных летнему сезону 2010 года, рассмотрим пространственное распределение коэффициентов тренда летних температур на территории России за 35-летний период современного глобального потепления на рис. 6.4.

Можно видеть, что в западной части страны тренд (скорость) потепления летних сезонов достигает более $0,9$ °С/10 лет, в восточной части – $0,5$ °С/10 лет, а между ними, на территории Средней Сибири и соседнего Казахстана, сколько-нибудь существенные тренды (однаправленные изменения) в рядах температуры практически отсутствуют. Соответственно, в районе максимальной жары летом 2010 года вклад глобального потепления в аномалию летней температуры можно оценить в $\sim 2,5$ – $3,0$ °С, что составляет существенную долю величины наблюдаемой аномалии. Таким образом, хотя летом

2010 года основной причиной формирования рекордно жаркой погоды на Европейской территории России, несомненно, был мощный блокирующий антициклон, вклад глобального потепления нельзя не учитывать. Следует также помнить, что при оценке последствий жары для биологических объектов существуют критические значения, превышение которых приводит к существенным негативным последствиям, таким как инфаркты и т. д.

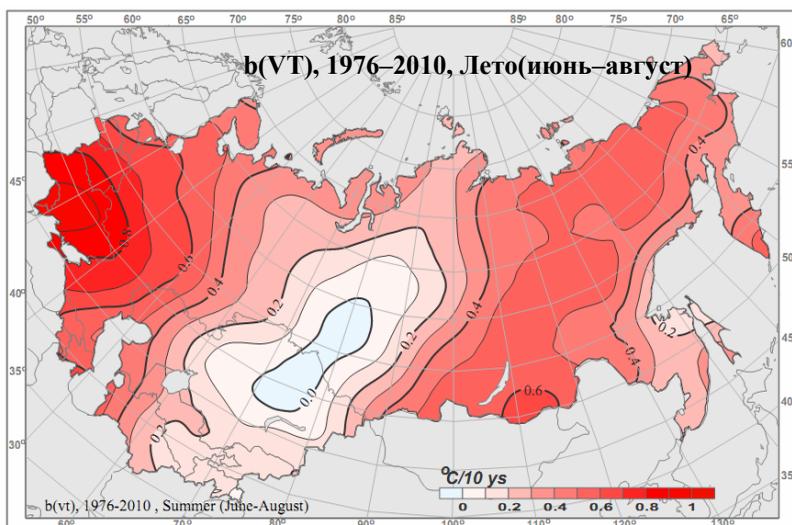


Рисунок 6.4 – Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда летних температур на территории России и соседних государств по данным наблюдений за 1976–2010 гг. (°C/10 лет).

7. ДИНАМИЧЕСКИЕ НОРМЫ И ДИНАМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

В середине прошлого столетия (XX век) в климатологии подразумевалось, что современный климат практически можно считать постоянным. Конечно, климатологи знали об изменениях палеоклиматов, но последние были объектом внимания скорее геологов, чем климатологов. Временные масштабы этих изменений порядка тысяч и миллионов лет, как и вековые изменения, изучаемые палеоклиматологами, казались слишком медленными, чтобы их учитывать при изучении «современного» климата. Поэтому считалось, что для оценки статистических параметров метеорологических величин, необходимых для изучения климата и решения прикладных задач, целесообразно использовать весь доступный ряд наблюдений. Так, для подготовки климатических справочников России в 1960-е гг. использовались данные за 80 лет, а так как станций с таким периодом наблюдений было мало, разрабатывались специальные методы приведения доступных (коротких) рядов наблюдений к единому периоду. Ученые-климатологи уже тогда понимали важность проблемы обнаружения изменений климата и однородности рядов наблюдений. В качестве примера можно указать монографии (Рубинштейн, 1979; Рубинштейн, Полозова, 1966).

Для температуры воздуха и других метеорологических величин, имеющих симметричную функцию распределения, важнейшим статистическим параметром является среднее многолетнее значение, получившее название «норма». Кстати, в математической статистике среднее тоже имеет специальное название – «математическое ожидание», что лучше передает смысл среднего как наиболее вероятного значения для величин с симметричными функциями распределения.

В то же время активно велись работы по разработке методов долгосрочных прогнозов погоды на месяц, сезон, год. Объектом прогноза в них в первую очередь были отклонения средней месячной (сезонной, годовой) температуры воздуха от нормы, называемые «аномалиями». Для оценки качества методических долгосрочных прогнозов рассматривалось их преимущество над «климатическим

прогнозом», под которым понимался прогноз климатической нормы. Методы оценки качества прогнозов, как предложенные в России (Багров, 1966), так и рекомендуемые Всемирной метеорологической организацией (WMO, 2006), предусматривают такое сравнение.

В целях упорядочения процесса подготовки долгосрочного прогноза и выработки единой системы оценивания качества прогнозов ВМО был принят единый 30-летний период для оценки климатических норм. Первый установленный ВМО период для оценки норм был 1931–1960 (WMO, 1962), затем – 1961–1990 (WMO, 1989). Следующим периодом должно стать 30-летие 1991–2020 гг.

В настоящее время, в соответствии с рекомендациями ВМО, метеорологические службы всех стран в практике метеорологического обслуживания продолжают использование 30-летних норм и аномалий (отклонений от 30-летних норм). Однако в связи с несомненным фактом глобального потепления актуальной стала задача пересмотра ряда фундаментальных понятий климатологии и долгосрочного прогноза. Назрела необходимость учета наблюдаемых изменений климата и в методологии прогнозирования, и при оценке качества прогнозов. Авторы предлагают использовать для этой цели «динамические климатические нормы».

7.1. Определения

Традиционно в долгосрочном прогнозе в качестве предсказываемых величин (предиктантов) используется так называемая «аномалия» (месячная или сезонная), т.е. отклонение текущего значения прогнозируемой переменной (средней за месяц или сезон конкретного года) от средней многолетней за базовый период (в настоящее время – 1961–1990 гг.). Даже для температуры воздуха временной ряд таких аномалий, как показывает опыт, не обладает свойствами рядов, для которых разработаны статистические методы прогноза (стационарность, эргодичность и т.д.). Доступный ряд инструментальных наблюдений к тому же очень ограничен (50–100 лет) при весьма значительной многомерности (количество независимых пунктов наблюдений порядка сотен). Поиск прогностических признаков для долгосрочного (на месяц–сезон–год) прогноза температуры учеными

XX века осуществлялся среди характеристик синоптических процессов с учетом сезонности, но без учета изменений климата.

В настоящей работе предлагается новый подход к формированию «предиктанта» с использованием концепции «динамических норм» и «динамических аномалий». Он рассматривается здесь на примере данных о среднемесячной температуре приземного воздуха на станциях постсоветской территории (ГР, 2011, 2012).

В соответствии с предложенной методологией, «динамические» нормы региональных (локальных) температур конкретного сезона рассчитываются как отклик на изменение глобальной температуры, которая выступает здесь в роли индикатора глобальных изменений климата. Точнее, «динамические» нормы рассчитываются методом наименьших квадратов (линейная регрессия) с использованием в качестве регрессора глобальной температуры одноименного месяца, предварительно сглаженной 11-летним фильтром (результат осреднения относится к последнему году периода сглаживания – так называемое «сглаживание назад»). Уравнение регрессии оценивается по периоду определенной длины (21–31–41 лет) и экстраполируется на один год, непосредственно следующий за периодом оценивания. Наиболее эффективным в качестве базового периода представляется период в 31 год.

В качестве предсказываемых величин предлагается использовать «динамические» аномалии (отклонения температуры воздуха от «динамических» норм), которые уже не содержат ни межсезонных изменений, ни текущих многолетних трендов (изменений климата). Рабочая гипотеза состоит в том, что прогностические признаки, характеризующие начальные циркуляционные и синоптические условия, ответственны за формирование именно этих «динамических» аномалий, которые и должны быть объектом прогноза. Что касается поправки на «сезонность» и «изменение климата», то ее нужно будет ввести непосредственно в прогноз – например, как аддитивную составляющую в терминах тех же «динамических» норм (далее термин «динамический» будет использоваться без кавычек).

На рис. 7.1 для примера приведены временные ряды традиционных и динамических аномалий среднемесячной температуры в Москве для января и июля. Первые рассчитаны как отклонения от

постоянных норм 1961–1990 гг., а вторые – как отклонения от динамических норм с длиной базового периода $N=31$ (регрессия на глобальную температуру, оцененная за предшествующее 31-летие).

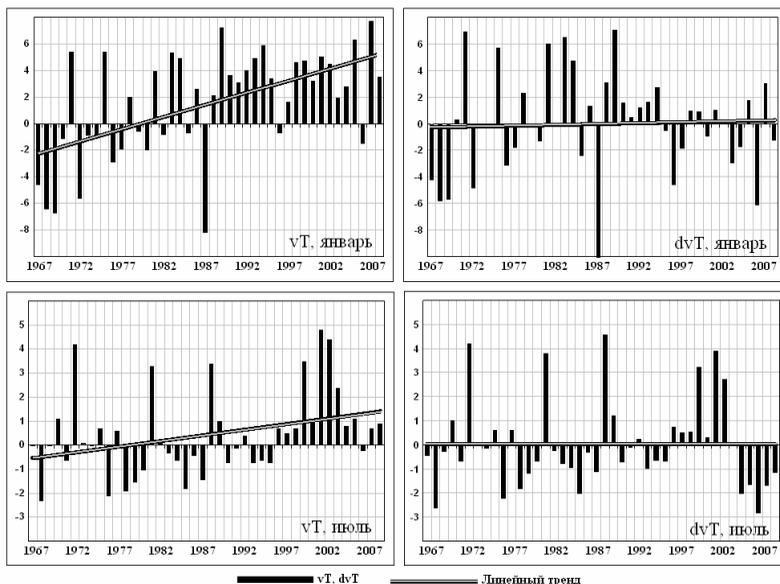


Рисунок 7.1 – Ход январских (вверху) и июльских (внизу) аномалий среднемесячной температуры приземного воздуха в Москве в течение 1967–2008 гг.: *слева – традиционные аномалии vT ; справа – динамические аномалии dvT*

Аналогичные среднемесячные аномалии температуры (в среднем для территории России) для всех месяцев года приведены на рис. 7.2 (абсцисса – месяц, ордината – год). Для большей наглядности горизонтальная шкала дополнена тринадцатым месяцем, дублирующим январь следующего года. Поскольку интерполяция аномалий одноименных месяцев за соседние годы была бы необоснованной, здесь использована мозаичная диаграмма, наглядно отображающая чередование аномалий разного знака и интенсивности.

Диаграммы приведены для трех видов аномалий: традиционных, динамических и нормированных динамических аномалий, выраженных в долях стандартных отклонений динамических аномалий соответствующего периода. Можно видеть, что процесс

многолетних изменений динамических аномалий гораздо более близок к статистически стационарному процессу. Традиционные аномалии дают информацию больше об изменении климата, тогда как в динамических аномалиях составляющая, связанная с изменением климата, исключена. Нормированные динамические аномалии образуют практически стационарный процесс, не содержащий многолетних и сезонных трендов (этот вывод был дополнительно подтвержден оценками по критерию серий Вальда-Вольфовица).

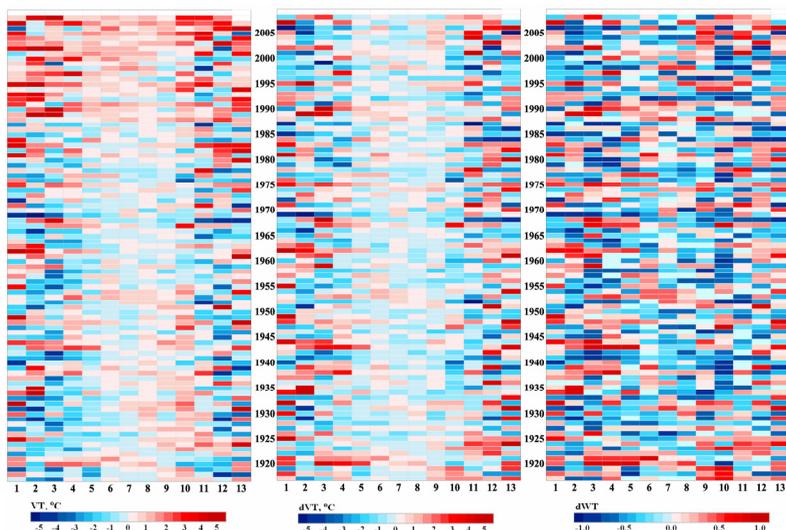


Рисунок 7.2 – Изменение осредненных по территории России аномалий среднемесячной температуры приземного воздуха в течение 1910–2008 гг. в зависимости от месяца (ось абсцисс) и года (ось ординат): VT – традиционные аномалии (слева), dVT – динамические аномалии (в центре); dWT – нормированные динамические аномалии (справа)

Обсуждение

Проблема оценки динамических климатических норм представляется весьма актуальной и своевременной. Тем не менее, хотя вопрос обновления климатических норм активно обсуждается в научной литературе, близкая постановка задачи встретилась нам лишь в работе (Livezey et al., 2007), где предложены некоторые эмпирические альтернативы, которые производят «разумно точные» нормы для

текущего климата и при этом обеспечивают их экстраполяцию на несколько лет вперед.

Одной такой альтернативой авторы цитируемой работы считают «оптимальные климатические нормы» (OCN), т.е. многолетние средние, которые не зафиксированы на 30-летних периодах, подобно нормам ВМО, а получены простой краткосрочной экстраполяцией (по инерции) климатических данных. Периоды для оценки норм подбираются, как правило, более короткие (15–10 лет) на основе анализа формы временного ряда, убедившись в отсутствии значительных трендов и длительных периодов экстраполяции (ясно, что эта процедура допускает широкую свободу субъективных решений).

Вторая альтернатива – линейный тренд, подогнанный методом наименьших квадратов к периоду с середины 1970-х гг. Она предлагается в случае очень сильных линейных трендов или более длительных экстраполяций. Период (с 1970-х гг.) выбран как наиболее подходящий для США, поскольку тренд здесь в этот период почти линейный.

Третья, наиболее эффективная, альтернатива – *hing*-подгонка нормы на основе моделирования зависимости крупномасштабных изменений климата от времени, т. е. метод МНК в применении к классу моделей *hing*-формы (форма «клюшки»). В работе подчеркивается, что таким образом будут более точно смоделированы «наблюдаемые характеристики наиболее вероятной причины быстрого изменения норм, а именно глобального изменения климата».

В первой из этих методик экстраполяция состоит в том, что последнее вычисленное значение приписывается будущей норме, а в последних двух в будущее экстраполируется линейный тренд. Здесь можно использовать более длительные данные для получения устойчивых оценок современных тенденций.

На наш взгляд, в статье очень предметно и всесторонне сформулирована проблема и высказан ряд обоснованных и перспективных суждений относительно нелинейных и адаптивных методов оценки трендов. Однако все предложенные в статье решения остаются в рамках экстраполяции временного ряда по линии тренда и, кроме того, отсутствуют критерии для однозначного выбора предпочтительной модели.

В целом, в рассмотренной статье предложен подход, который эффективен на большей части территории США (но не на всей), где текущие климатические тренды приблизительно линейны или близки к таковым. Хотя авторы статьи исходили из необходимости «наиболее точно учесть наблюдаемые характеристики глобального изменения климата как наиболее вероятной причины быстрого изменения норм», в предложенных методиках фактически учтена зависимость не от глобального изменения климата, а от формы тренда *в рассматриваемом регионе*, т. е. форма *локальной зависимости от времени*. В результате, связь с глобальным изменением климата обеспечивается только сходством формы *локального* тренда и тренда глобальной температуры. И именно по этой причине данная методика не «работает» в регионах, где тренд существенно отличается от линейного и от формы «клюшки».

В этом контексте предложенный выше подход к оценке норм с использованием регрессионного отклика локальной температуры на изменение глобальной температуры (еще и сглаженной 11-летним фильтром) представляется нам более целенаправленным и последовательным. В этом случае действительно учитывается зависимость региональной климатической нормы от характеристик глобального изменения климата, отражающих суммарный эффект всех вызвавших их причин. Существенным преимуществом этого подхода является также и унифицированное для всех регионов алгоритмическое решение сопутствующих проблем (таких, как оценка OCN). Уместно также напомнить, что при анализе изменения изменчивости температуры (раздел 3.3) также было показано, что глобальная температура в качестве фактора (модель AG) дает более устойчивые результаты, чем время (модель AY), и, следовательно, является более эффективным индикатором глобального изменения климата.

7.2. Прогностическая ценность динамических норм для прогноза среднемесячной температуры воздуха

Интересно оценить прогностическую информативность самих динамических норм, рассматривая их как некий «промежуточный» прогноз, являющийся определенным усовершенствованием климатического прогноза. Оценка получена здесь по данным наблюдений за

температурой приземного воздуха на 70 станциях СНГ, официально принятых в Гидрометцентре России в качестве базовой сети для оценки качества месячных и сезонных прогнозов в настоящее время. Для эксперимента выбран период с середины 1930-х гг. (до 1936 г. данные стационарных наблюдений неоднородны и содержат большое количество пропусков), так что оценку успешности прогнозов имеет смысл начать с середины 1960-х гг. (по истечении 31-летнего базового периода, необходимого для оценки «динамических норм» начального года). Отметим также, что на ряде станций ближнего зарубежья отсутствуют данные после середины 1990-х гг. в связи с разрушением наблюдательной сети в период распада СССР. Из 68 наиболее полных станций СНГ 49 станций – российские; на Европейской территории СНГ (ЕТ СНГ) расположены 28 станций. Наиболее репрезентативными в данном эксперименте следует считать оценки с середины 1960-х гг. на российских станциях.

В качестве показателей успешности (или ошибочности) группы прогнозов на конкретной станции используются: средняя ошибка (e), средняя абсолютная (a), квадратическая (q) и относительная (δ) ошибки и коэффициент корреляции ($corr$). Совокупность прогнозов на каждой станции за период испытаний 1967–2008 гг. представлена 504 значениями (42 года \times 12 месяцев). Региональные оценки включают средние и экстремальные из стационарных оценок и показатель сходства полей по знаку аномалии (ρ).

Таким образом, точечные оценки характеризуют качество прогнозов на всем рассматриваемом временном интервале, но для каждой отдельно взятой станции, а региональные – качество всей совокупности прогнозов для региона в целом. Оценки получены параллельно для динамических и традиционных норм. В последнем случае в качестве прогноза всегда предлагается поле нулевых аномалий. Понятно, что для таких прогнозов оценки корреляции и сходства полей по знаку не имеют смысла.

На рис. 7.3 представлены обобщенные за период испытаний точечные оценки успешности динамических норм в качестве прогноза среднемесячной аномалии температуры с заблаговременностью 1 год. Региональные оценки для территории России и территории СНГ в

целом представлены в табл. 7.1. Оценка q получена как среднее квадратическое значение: усредняются квадраты станционных значений и из среднего квадрата извлекается квадратный корень. Экстремальные значения указывают диапазон колебаний точечных значений на территории региона.

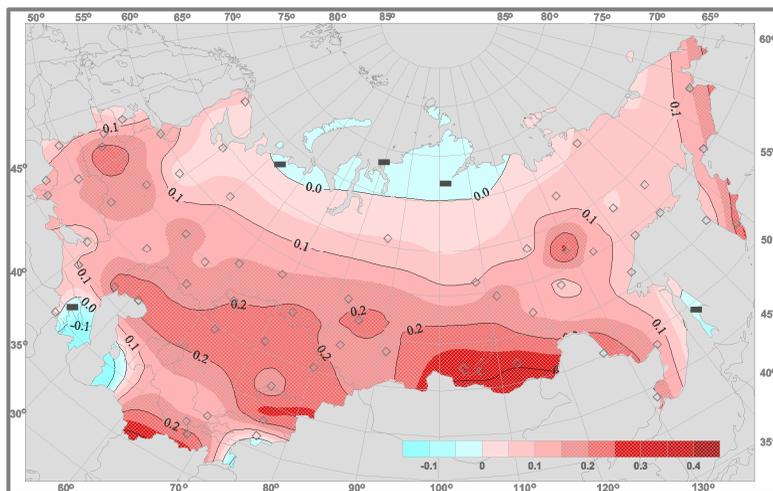


Рисунок 7.3 – Географическое распределение коэффициентов корреляции между ходом динамических норм и наблюдаемой температурой на 68 станциях СНГ за период 1967–2008 гг. Штриховкой выделены области корреляции $r > 0.15$ (значимы на 1%-ном уровне). Местоположение станций с отрицательной корреляцией указано знаком «минус» (5 станций), остальных станций – ромбами.

Наиболее существенными представляются следующие два момента. Во-первых, явное преобладание положительной корреляции между ходом динамических норм и фактическим ходом температуры практически на всей территории (за исключением 5 станций на прибрежных территориях – Тбилиси, Поронайск, Нарьян-Мар, о. Диксон и Хатанга, где корреляция незначительно ниже 0). Повидимому, используемые динамические нормы действительно отражают общую тенденцию в изменении региональных и локальных температур на 30-летних временных интервалах. Понятно, что традиционный климатический прогноз (нулевое поле аномалий) таким свойством не обладает по определению.

Таблица 7.1

**Оценки успешности точечных прогнозов
среднемесячных аномалий температуры
за период испытаний 1967–2008 гг. (столбцы)
для динамических норм и традиционного
климатического прогноза, обобщенные
по территории СНГ, России и ЕТ СНГ**

<i>Обобщение по станциям региона</i>	<i>Динамические нормы</i>				<i>Традиционный климатический прогноз</i>		
	<i>Corr</i>	<i>e</i>	<i>a</i>	<i>q</i>	<i>e</i>	<i>a</i>	<i>q</i>
СНГ (68 станций)							
Среднее	0,13	0,09	1,98	2,69	-0,39	1,92	2,61
Минимум	-0,05	-0,32	1,15	1,50	-0,74	1,20	1,49
Максимум	0,29	0,44	2,97	3,99	0,12	2,79	3,76
РФ (49 станций)							
Среднее	0,13	0,09	2,05	2,79	-0,41	2,00	2,70
Минимум	-0,04	-0,19	1,15	1,50	-0,74	1,21	1,56
Максимум	0,29	0,44	2,97	3,99	-0,05	2,79	3,76
ЕТ СНГ (23 станции)							
Среднее	0,11	0,03	1,99	2,65	-0,31	1,91	2,55
Минимум	-0,05	-0,10	1,29	1,63	-0,51	1,20	1,49
Максимум	0,21	0,27	2,97	3,88	0,12	2,79	3,63

Примечание: Оценки *Corr*, *e*, *a*, *q* получены для каждой станции по совокупности 504 прогнозов за 1967–2008 гг. и затем обобщены по станциям региона.

Второе важное обстоятельство касается средней ошибки. При использовании в качестве прогноза динамических норм средняя ошибка колеблется на территории СНГ (от станции к станции) около 0,09 °С в почти симметричном интервале (от -0,32 до +0,44 °С), тогда как при традиционном подходе имеет место явное смещение: среднее значение -0,39 °С, а область изменения – от -0,74 до 0,12 °С. Примерно то же смещение имеет место на подмножестве станций России и на Европейской территории СНГ. Это смещение определено связано с современным потеплением климата, вследствие которого по мере удаления от традиционного базового периода увеличивается разрыв между наблюдаемой температурой и нормой 1961–1990 гг. Различие между динамическими нормами и традиционным климатическим

прогнозом в терминах абсолютной и квадратической ошибки, как и относительной ошибки, несущественны.

Следующая группа оценок представлена в табл. 7.2 и на рис. 7.4. Здесь объектом оценивания является прогностическое поле значений аномалии температуры на 68 станциях, относящихся к единому сроку прогноза (годо-месяцу). Показателями являются перечисленные выше пространственные статистики, так что каждая из шести оценок отображается временным рядом из 504 значений месячной дискретности. В таблице приведены оценки, обобщенные по этим 504 значениям. На рис. 7.4 изображен ход оценки ρ за 1967–2008 гг., сглаженный скользящим 13-месячным фильтром.

Таблица 7.2

**Оценки успешности прогнозов поля аномалий
среднемесячной температуры на территории СНГ,
России и ЕТ СНГ для динамических норм
и традиционного климатического прогноза,
обобщенные за период испытаний 1967–2008 гг.**

<i>Обобщение за период испытаний 1967–2008</i>	<i>Динамические нормы</i>				<i>Традиционный климатический прогноз</i>			
	<i>Corr</i>	<i>e</i>	<i>a</i>	<i>q</i>	<i>ρ</i>	<i>e</i>	<i>a</i>	<i>q</i>
СНГ (68 станций)								
Среднее	0,02	0,08	1,98	2,46	0,09	-0,40	1,93	2,62
Минимум	-0,78	-4,43	0,71	0,89	-0,71	-5,85	0,66	0,80
Максимум	0,77	6,14	6,14	7,12	1,00	6,16	6,38	7,48
РФ (49 станций)								
Среднее	0,01	0,09	2,05	2,54	0,08	-0,41	2,00	2,70
Минимум	-0,83	-4,78	0,55	0,70	-0,71	-5,93	0,62	0,79
Максимум	0,75	6,27	6,27	7,13	1,00	6,37	6,37	7,16
ЕТ СНГ (23 станции)								
Среднее	0,02	0,03	2,00	2,36	0,04	-0,31	1,92	2,56
Минимум	-0,87	-6,02	0,42	0,58	-1,00	-7,60	0,43	0,56
Максимум	0,87	6,29	6,68	7,37	1,00	6,83	7,60	7,82

Примечание: Оценки *Corr*, *e*, *a*, *q*, ρ получены для каждого года-месяца по стационарным значениям (на 68, 49 и 23 станциях) и затем обобщены по 504 прогнозам за 1967–2008 гг.

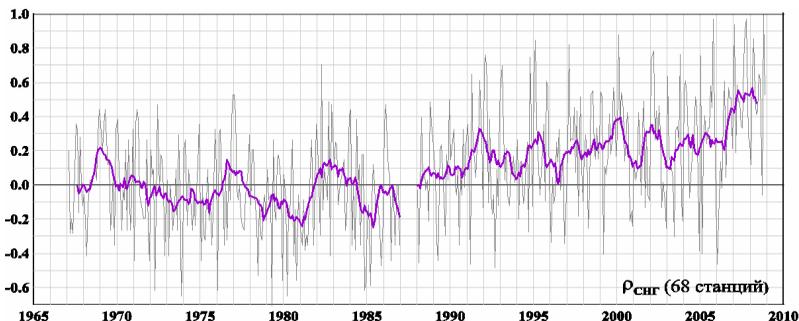


Рисунок 7.4 – Сходство по знаку (показатель ρ) полей динамических норм и фактически наблюдавшихся традиционных аномалий на территории СНГ для каждого месяца в течение 1967–2008 гг. Оценки ρ для каждого годо-месяца рассчитаны по 68 станционным «прогнозам». Сглаженная кривая получена скользящим 13-месячным осреднением.

Отметим, что в табл. 7.1 экстремальные значения (минимум и максимум) характеризуют диапазон значений осредненных по времени точечных оценок успешности, т.е. их пространственную изменчивость, тогда как в табл. 7.2 они описывают временную изменчивость региональных (осредненных по территории) оценок успешности. Понятно, что средние значения одноименных оценок в таблицах 7.1 и 7.2 очень близки (различия вызваны наличием изолированных пропусков в данных наблюдений).

Таким образом, «динамические нормы» представляют собой оценку меняющегося среднего (математического ожидания) и содержат определенную прогностическую информацию, связанную с сезонным ходом и откликом на изменения климата, и ее полезно учесть в прогнозе как некую «промежуточную» составляющую. С другой стороны, предполагается разработать метод поиска потенциальных предикторов для прогноза «динамических аномалий» с заблаговременностью более двух-трех недель, для чего могут быть привлечены характеристики макросиноптических процессов, формирующих эти аномалии.

В целом, сформулирована концепция «динамических норм» и «динамических аномалий» температуры приземного воздуха, которые

учитывают текущие тенденции в изменении климата и межсезонную изменчивость. Предложен вариант регрессионного адаптивного метода вычисления таких «динамических норм» как функции индикатора глобальных изменений климата. Приведены некоторые оценки полезности «динамических норм» в качестве «промежуточных» прогнозов (аналог «климатического прогноза» в условиях меняющегося климата).

В дальнейшем предполагается усовершенствовать методы и технологию оценивания и прогноза «динамических норм» и «динамических аномалий» температуры воздуха и на их основе разработать метод поиска потенциальных предикторов для прогноза крупных аномалий погоды на срок более трех недель.

7.3. Оценка изменения повторяемости экстремальных климатических аномалий в зависимости от изменения средних и дисперсий

Изменения в повторяемости экстремальных климатических аномалий и «опасных явлений» в условиях меняющегося климата, в частности при современном глобальном потеплении, относятся к числу наиболее сложных и существенных факторов, учет которых необходим для научно обоснованной оценки возможных последствий происходящих изменений климата и выработки оптимальных стратегий адаптации. Связано это прежде всего с потенциальным ущербом от изменения в частоте, продолжительности и интенсивности экстремальных явлений, который может значительно превышать неблагоприятные последствия от сравнительно небольших изменений средних. С другой стороны, отклик социоэкологической, в частности климатической, системы на относительно слабое внешнее воздействие может оказаться существенно более значительным «на хвостах» распределения, чем в его центральной части, т.е. экстремумы могут быть более чувствительны к воздействиям, чем средние. Так, во многих регионах наблюдается (и ожидается) рост интенсивных (ливневых) осадков, в то время как суммарные осадки изменяются мало.

Ниже рассматривается частная задача данной проблемы – оценка изменений в статистиках климатических экстремумов при

известном распределении рассматриваемой климатической переменной. При любой функции распределения изменения в статистиках экстремумов связаны непосредственно с изменением средних и дисперсий. Однако ситуация значительно усложняется взаимодействием этих изменений. Даже при нормальном распределении совместные изменения средних и дисперсий (возможно, разнонаправленные) приводят к весьма сложной картине изменения экстремумов. Тем более это относится к несимметричным распределениям, зависящим более чем от двух параметров (например, осадков).

Рис. 7.5 иллюстрирует, как меняется повторяемость «теплых» и «холодных» экстремумов *при увеличении климатической средней без изменения дисперсии*. В случае нормального распределения при этом увеличится повторяемость экстремально высоких значений и уменьшится повторяемость низких значений. На рисунке этот факт проиллюстрирован оценками для временного ряда суточных максимумов температуры на станции «Курск» в предположении нормального закона распределения.

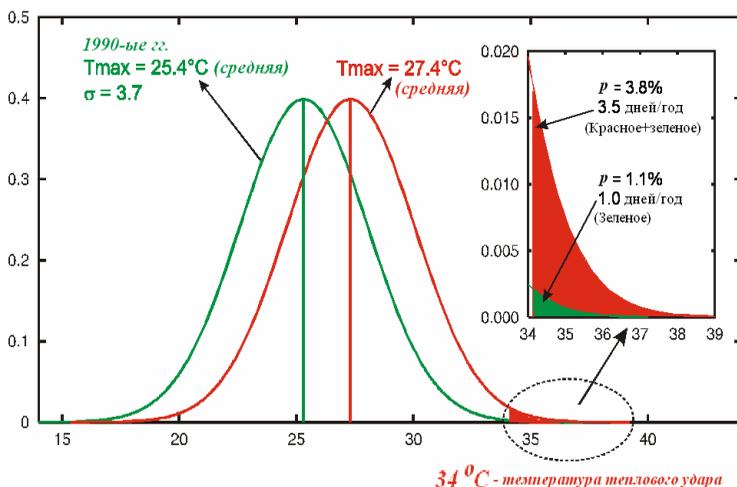


Рисунок 7.5 – Оценка ожидаемого через 20–30 лет увеличения повторяемости опасных высоких температур (выше 34 °С) при условии, что средняя температура вырастет на 2 °С, а дисперсия останется без изменения – 13,69 (°С)².

Как следует из рисунка, при современном климате ($e = 25,4 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 3,7 \text{ }^\circ\text{C}$) вероятность осуществления температур выше $34 \text{ }^\circ\text{C}$ (пороговая температура теплового удара) составляет 1,1 %. При потеплении на $2 \text{ }^\circ\text{C}$ (но при той же изменчивости) вероятность теплового удара повысится до 3,8 %.

Будем считать далее, что задача ограничена рамками одного распределения, и притом близкого к нормальному (хотя в общем случае распределения наблюдаемых климатических величин являются смесью различных распределений – например, относящихся к различным типам циркуляции).

На рис. 7.6 представлена номограмма для общего случая изменения вероятностей на «хвостах» нормального распределения с изменением только среднего: $N(0,1)$ – современный «климат», $N(e,1)$ – «климат» будущего. Ось абсцисс соответствует изменению среднего значения (e -shift), а ось ординат – искомому значению вероятности экстремума при новом «климате». Уровень значимости искомого экстремума, т.е. его повторяемость в $N(0,1)$ (см. легенду), определяет, какую из кривых следует использовать для определения искомой вероятности в $N(e,1)$.

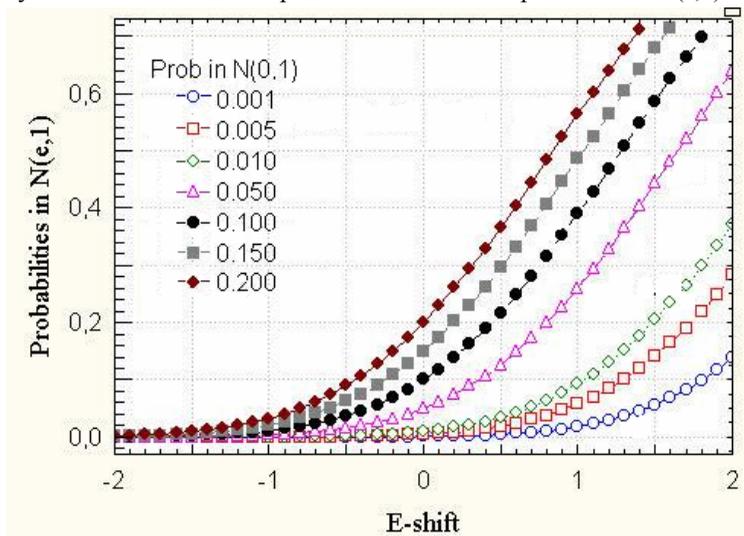


Рисунок 7.6 – Номограмма для оценки изменений повторяемости экстремальных значений для нормально распределенных величин (распределение $N(0,1)$) при сдвиге среднего значения на величину e (распределение $N(e,1)$).

С другой стороны, рост дисперсии без изменения средних приводит к росту повторяемости как максимумов, так и минимумов, а уменьшение дисперсии – к убыванию повторяемости экстремумов.

Номограмма для случая изменения дисперсий без изменения средних приведена на рис. 7.7. Условные обозначения – те же. На оси абсцисс указано отношение стандартных отклонений S-ratio (нового климата к исходному), так что $S < 1$ соответствует уменьшению климатической изменчивости. При нормированном исходном распределении $N(0,1)$ множитель S означает стандартное отклонение при новом «климате».

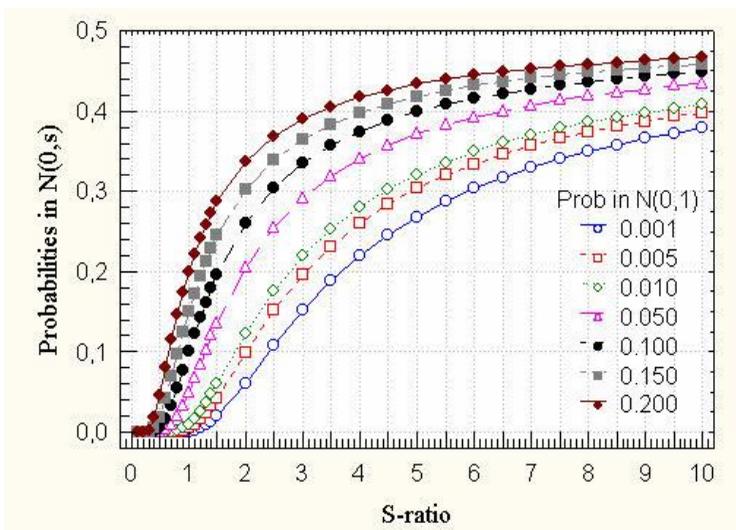


Рисунок 7.7 – Номограмма для оценки изменений повторяемости экстремальных значений для нормально распределенных величин (распределение $N(0,1)$) при s-кратном изменении сигм (распределение $N(0,s)$)

Однако совместные изменения среднего и дисперсии приводят к весьма сложной картине изменения экстремумов (особенно для несимметричных распределений, таких, как распределение осадков, зависящих более чем от двух параметров).

В применении к нормальному распределению такие номограммы представлены ниже (рис. 7.8) для трех фиксированных значений вероятности отсекаемых экстремумов $p_0 = 0,001, 0,01$ и $0,1$ (часто

называют обеспеченностью). Здесь p_0 означает вероятность осуществления прогнозируемых климатических аномалий при исходном климате: превышение соответствующего этой вероятности процентиля рассматривается как осуществление экстремальных условий. Например, при $p_0 = 0,1$ к экстремальным относятся условия, превысившие 90-й процентиль распределения (т.е. в 10 % самых больших значений).

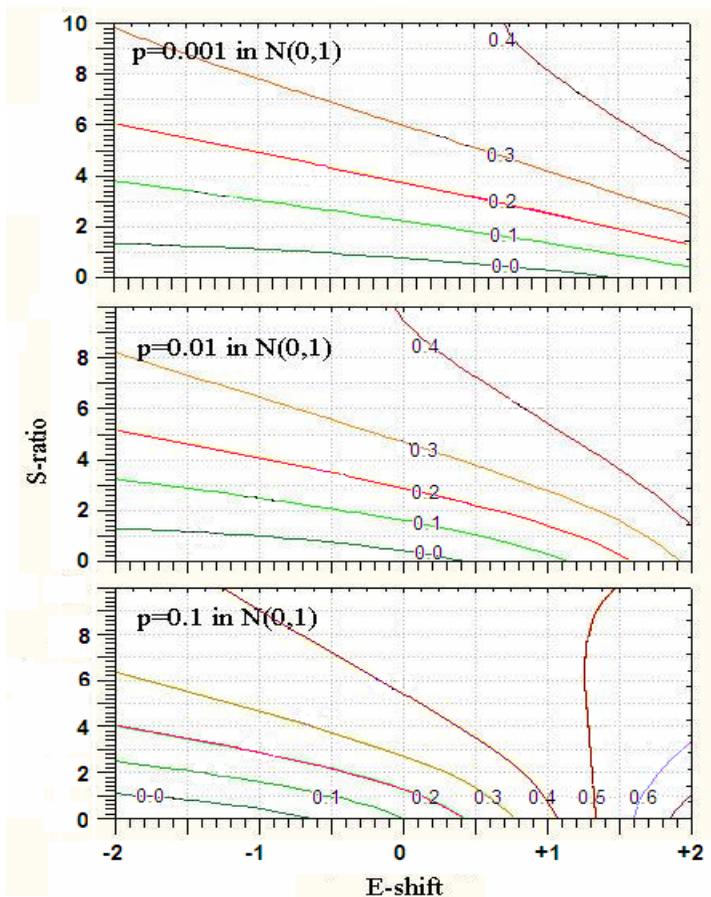


Рисунок 7.8 – Номограммы изменения вероятности экстремальных величин заданной обеспеченности как функция изменения среднего (ось X) и дисперсии (ось Y) (разъяснения см. в тексте)

Более подробный комментарий к этим номограммам представлен ниже при описании возможной процедуры «сценарного прогноза» ожидаемых антропогенных изменений вероятности экстремальных климатических условий.

Пусть прогнозируемая переменная имеет нормальное распределение N с известными параметрами при текущем климате (исходном) и ожидаемом. Без ограничения общности примем в качестве исходного распределения нормированное нормальное распределение с нулевым средним и единичной дисперсией $N(0,1)$, а в качестве ожидаемого – $N(e,s)$. Дисперсию исходного распределения (до нормирования) обозначим через σ .

На рис. 7.8 приведены три номограммы изменения вероятности экстремумов при изменении климатического среднего e в пределах $\pm 2\sigma$ (E-shift), а стандартного отклонения σ – в пределах от 10-кратного уменьшения до 10-кратного увеличения (S-ratio), что полностью охватывает диапазон оценок МГЭИК для ожидаемых антропогенных изменений климата за счет роста концентрации парниковых газов.

Каждая номограмма соответствует одному из трех уровней экстремальности при текущем климате $N(0,1)$: $p_0 = \{0,001; 0,01; 0,1\}$. Группа кривых, изображенных на диаграмме, указывает вероятность осуществления таких экстремумов *при будущем «климате»* $N(e, s)$. Эти кривые по существу являются изолиниями равных вероятностей, между которыми правомерна интерполяция. Алгоритм использования этих номограмм для прогноза ожидаемых антропогенных изменений вероятности экстремальных климатических условий в заданном регионе может быть сведен, например, к следующему:

- выбирается вероятность p_0 , которая при текущем климате определяет уровень экстремальных аномалий (превышение соответствующего этой вероятности процентиля рассматривается как осуществление экстремальных условий);
- выбирается «сценарий» изменения антропогенного воздействия (например, сценарий изменений концентрации CO_2) и соответствующие ему экспертные оценки ожидаемых изменений климата, т.е. оценки среднего и сигмы распределения, соответствующего будущему климату;

- для выбранного сценария определяется ожидаемое смещение среднего *E-shift* и изменение (отношение) сигм *S-ratio*;
- на номограмме, соответствующей выбранному уровню экстремальности p_0 , находится точка, соответствующая ожидаемым изменениям среднего (*E-shift*) и сигмы (*S-ratio*) распределения.

Таким образом, предложенные номограммы реализуют один из возможных подходов к получению прогностической оценки частоты климатических экстремумов в зависимости от принятой проекции (сценарного прогноза) изменения климатических средних и дисперсий для нормально распределенных величин. Данный подход может быть реализован для территории отдельных регионов, и в частности для территории России.

8. ОЦЕНКА ПРЕДСТОЯЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

8.1. Оценка климатического отклика приповерхностной температуры воздуха на изменения концентрации двуокиси углерода и аэрозоля в атмосфере

Оценки климатического отклика температуры приземного воздуха на изменения концентрации двуокиси углерода и аэрозоля в атмосфере получены по данным наблюдений и результатам моделирования (использованы результаты, полученные с помощью транзитивной глобальной климатической модели системы океан – атмосфера HadCM2 в Hadley-центре Метеорологической службы Англии). Более подробный анализ оценок по наблюдаемым и модельным данным и результаты их сопоставления представлены и проиллюстрированы в (ГР, 1999). Здесь остановимся лишь на основных выводах.

Наблюдаемое глобальное потепление климата в XX веке объясняется, главным образом, ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, в частности связанным с деятельностью человека (IPCC, 2001, 2007). Однако определение или атрибуция (attribution – приписывание) причин наблюдаемых изменений климата имеет в определенной степени вероятностный характер и оставляет значительную долю неопределенности.

Это связано, во-первых, с тем, что климатический отклик на предполагаемое воздействие (сигнал) достаточно мал по сравнению с уровнем естественной изменчивости климата («шума»). Во-вторых, пространственная структура климатического отклика известна по данным моделирования с весьма существенной неопределенностью. Отметим, что именно модельный отклик, соответствующий обычно равновесному (реже – нестационарному или транзитивному) климату, используется для атрибуции наблюдаемых изменений. Уточнение знаний о структуре климатического отклика и оценка точности его воспроизведения в процессе моделирования является актуальной задачей, которая объявлена МГЭИК важнейшей проблемой предстоящего пятилетия.

В настоящей работе региональный климатический отклик оценивался как реакция температуры на изменения концентрации двуокси углерода в атмосфере. Такая постановка задачи равнозначна задаче об оценке чувствительности климата, под которой понимается изменение температуры приземного воздуха при изменении объемной концентрации CO_2 на единицу. Значения концентрации для удобства приводятся здесь в миллионных долях («частей на миллион» – млн^{-1}), т.е. увеличенные в 10^6 раз. Как уже отмечалось, использованы результаты моделирования, полученные с помощью модели HadCM2 в Hadley-центре метеорологической службы Англии (Tett et. all, 1997). В качестве данных о наблюдаемом климате использован также описанный выше массив сеточных данных в 5-градусных «боксах» за период 1856–1997 гг. (Jones, 1994).

Существенно отметить, что данных наблюдений недостаточно, чтобы выполнить оценку локальной чувствительности климата на всей рассматриваемой территории. При анализе данных наблюдений авторы были вынуждены ограничиться регионом, ограниченном широтами 35 и 65° с.ш. и долготами 20 и 150° в.д. Только в этой области и можно сравнивать оценки, относящиеся к реальному и модельному климатам.

Основные результаты

1. Оценки локальной чувствительности температуры по данным наблюдений представляются приемлемыми в условиях современного климата при наблюдаемой концентрации парниковых газов и ее изменениях до 50 млн^{-1} (рис. 8.1). Оценки отклика существенно зависят от долготы, но практически не зависят от уровня климатического воздействия. Другими словами, при рассмотренных значениях и масштабах изменений концентрации CO_2 можно принять линейную зависимость между локальными изменениями температуры воздуха и изменением концентрации CO_2 (вместо логарифмической, принятой в общем случае для глобальной температуры приземного воздуха).

2. Пространственная форма и величина модельного отклика существенно отличаются от таковых по наблюдениям. Общий уровень наблюдаемого отклика выше, а пространственная структура сложнее, чем модельного. При этом выше и геометрическое подобие наблю-

денных сигналов, соответствующих различным уровням изменений концентрации парниковых газов.

3. Как в модельных оценках, так и в оценках по реальным данным, присутствуют области отрицательных значений локальной чувствительности (похолодание несмотря на рост CO_2). Однако их центры в «модельных» оценках существенно сдвинуты на восток, а над районами нижнего Поволжья и северо-запада Казахстана «реальная» и «модельная чувствительность» находятся в противофазе.

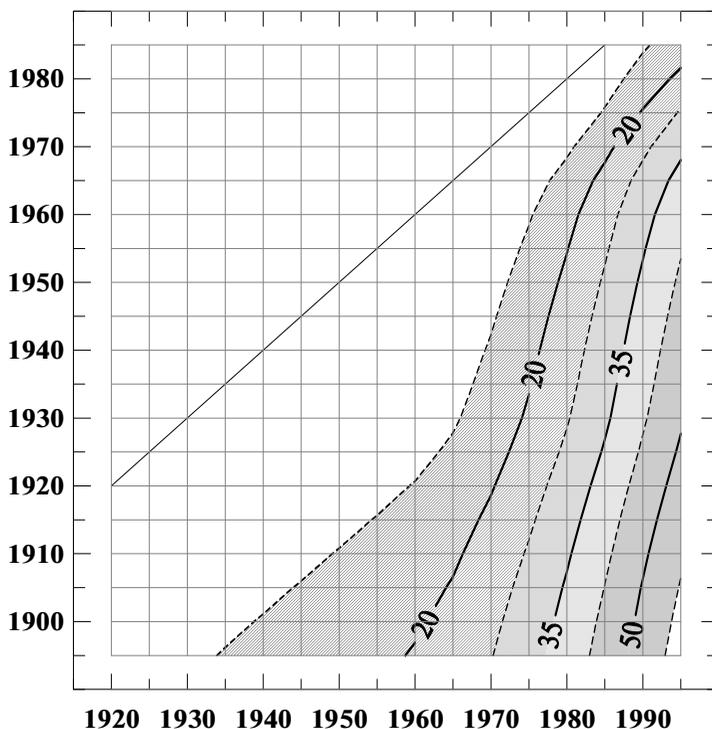


Рисунок 8.1 – Изменение скользящей средней десятилетней концентрации CO_2 как функция времени окончания более позднего (ось X) и более раннего (ось Y) десятилетий. Проведены изолинии 0, 20, 35 и 50 ppmv

Данные о пространственном распределении оценок чувствительности климата на территории России могут быть использованы как для атрибуции, т.е. для выбора наиболее вероятных причин наблюдаемых изменений климата, так и для построения проекций региональных изменений климата на будущее, в том числе при работе с новыми сценариями изменения климатообразующих факторов. Для получения прогноза предстоящих изменений климата достаточно умножить чувствительность в каждой точке на ожидаемое изменение концентрации парниковых газов, соответствующее выбранному сценарию эмиссии парниковых газов.

8.2. Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата

Вопрос о современных изменениях климата, наблюдаемых и ожидаемых в ближайшем будущем, и об их последствиях серьезно волнует человечество в течение последних десятилетий. Для исследования этой проблемы с середины 1970-х гг. под эгидой ВМО развернут ряд международных проектов и программ, учреждена Всемирная климатическая программа (ВКП), принята Рамочная конвенция по изменению климата (РКИК ООН), создана Межправительственная Группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, на английском языке – IPCC). В России принята Климатическая доктрина Российской Федерации (утверждена Распоряжением Президента РФ 17.12.2009 г., №861-рп, п. 29).

В 2007 г. Росгидромет опубликовал «Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России» (доступен на сайте Росгидромета <http://www.meteorf.ru>). В этом издании очень кратко изложены современные представления о наблюдаемых и ожидаемых изменениях климата на территории России. Основное внимание уделено оценке влияния климата и его изменений на окружающую среду и деятельность человека. Показано, что последствия изменений климата могут оказаться весьма существенными, и к ним необходимо вести серьезную подготовку.

В 2008 г. опубликована серия из трех статей сотрудников ГГО под общим названием «Климат России в XXI веке» (Мелешко и др.

2008а, 2008б; Говоркова и др., 2008). Название, на наш взгляд, выбрано неудачно. Более уместным, по-видимому, было бы говорить об ожидаемых изменениях климата или хотя бы о прогнозе климата, так как все выводы в этих статьях базируются на результатах климатического моделирования, а даже самые сложные современные климатические модели недостаточно совершенны. Кроме того, есть факторы формирования климата, о поведении которых нам пока ничего не известно (например, предстоящие извержения вулканов или новые технологии производства энергии).

Авторами предлагается несколько иной подход к составлению стратегического прогноза изменений климата (ГР, 2009).

8.2.1. Вероятностные прогнозы погоды и климата

Научный прогноз погоды и изменений климата при современном состоянии знаний и доступных данных наблюдений может быть только вероятностным. Это связано как с наличием хаотической составляющей в поведении изучаемой системы, так и с неточностью применяемых уравнений и их параметризаций, а также с неполнотой информации о начальных и граничных условиях. Последнее является неустранимой причиной существования предела предсказуемости погоды, который теоретически составляет примерно три недели, а на практике не превосходит 10 дней (речь идет о *предсказуемости 1-го рода*, т.е. о возможности прогнозирования расписания предстоящего поведения индивидуальных гидрометеорологических объектов). Для нелинейной системы, вообще говоря, практически невозможно предсказать конкретный ход ее развития, так как реальные начальные условия никогда не могут быть заданы с абсолютной точностью, а наличие так называемых точек бифуркации (ветвления) приводит к тому, что даже малые возмущения могут сильно повернуть направление эволюции.

Выдающийся ученый Эдвард Лоренц (Lorenz, 1963, 1996) образно сформулировал этот вывод следующим образом: в некоторых случаях взмаха крыльев бабочки достаточно для того, чтобы изменить направление потоков воздуха в атмосфере и вызвать обвальный процесс, напоминающий сход лавины с гор, что готов начаться от малейшего звука. Название «эффект бабочки» и сам этот образ

оказались настолько привлекательными, что нашли свое вполне законное место в литературе и даже в кино.

Однако за пределом предсказуемости 1-го рода, согласно *гипотезе* Э. Лоренца, может существовать так называемая **предсказуемость 2-го рода**, предполагающая, что статистические свойства процессов, такие, как средние, дисперсии и другие статистики метеорологических величин, а также функции распределения повторяемости, интенсивности и продолжительности гидрометеорологических явлений или экстремальных ситуаций, могут правильно воспроизводиться физико-математическими моделями.

Таким образом, предел предсказуемости 1-го рода определяется чувствительностью модели к начальным и граничным условиям, а предсказуемости 2-го рода – ее чувствительностью к граничным и внешним условиям (пример последних – солнечное излучение).

Анализ использования климатических моделей позволяет надеяться на справедливость *гипотезы* о существовании предсказуемости 2-го рода. Справедливость такой концепции означала бы возможность оценки вероятностей гидрометеорологических явлений, которые не наблюдались в действительности (например, экстремальных явлений и процессов). Что касается прогноза изменений климата, т.е. прогноза изменений вероятностных свойств и статистической структуры климатической системы, то для его осуществления необходимо иметь еще и прогноз изменения климатообразующих факторов как естественного, так и антропогенного происхождения.

8.2.2. О способности моделей воспроизводить некоторые характеристики изменений климата

Обнаружение изменений климата по данным наблюдений сводится обычно к поиску тенденций или трендов во временных рядах той или иной климатической переменной. Соответственно, говоря о способности моделей к воспроизведению изменений климата, мы вправе требовать от климатической модели, чтобы с ее помощью для любых характеристик физических процессов в климатической системе адекватно воспроизводились поля климатических средних (норм) и дисперсий за различные периоды, их сезонные изменения, а также долговременные тенденции (тренды) соответствующих временных

рядов. Приведем здесь лишь два примера: воспроизведение изменений среднегодовой глобальной приповерхностной температуры и воспроизведение индекса зональной циркуляции геострофического ветра в умеренных широтах Северного полушария.

На рис. 8.2 слева изображены временные ряды среднегодовой глобальной приповерхностной температуры за 1970–2000 гг. по данным наблюдений и по результатам климатического моделирования (17 моделей, указанные в легенде). Для каждой модели использованы результаты одного прогона. Справа показаны те же ряды, но после исключения из них линейного тренда. Можно видеть, что все модели воспроизводят тенденцию к потеплению (отклик на рост CO_2), но средний уровень температуры, и тем более межгодовые колебания большинством моделей воспроизводятся со значительной ошибкой. Модельные оценки среднего уровня температуры преимущественно ниже наблюдаемого. Наличие восходящего тренда в обоих рядах (модельном и наблюдаемом) обеспечивает их положительную корреляцию (от 0,475 до 0,870), но после исключения тренда средняя корреляция падает с 0,679 до 0,207. Для некоторых моделей корреляция становится отрицательной.

Качество воспроизведения индекса зональной циркуляции в умеренных широтах Северного полушария иллюстрируется на рис. 8.3. На нем представлены многолетние изменения индекса (в годовом осреднении) и сезонный ход многолетних средних. Обе оценки приведены по данным модели INM CM3.0 (модель ИВМ РАН) и по данным реанализа (NCEP/NCAR). Четко прослеживается весьма хорошее соответствие модели и реанализов в оценках средних (и по форме, и по порядку величин). Однако амплитуда годового хода в модели завышена (за счет более глубокого минимума в теплое время года), и минимум примерно на месяц опережает наблюдаемый по реанализам (в июне вместо июля). Что касается межгодовых изменений индекса, то корреляция соответствующих рядов практически отсутствует: в годовом осреднении она равна 0,01, а в отдельные месяцы не превышает 0,3 (здесь не приведены).

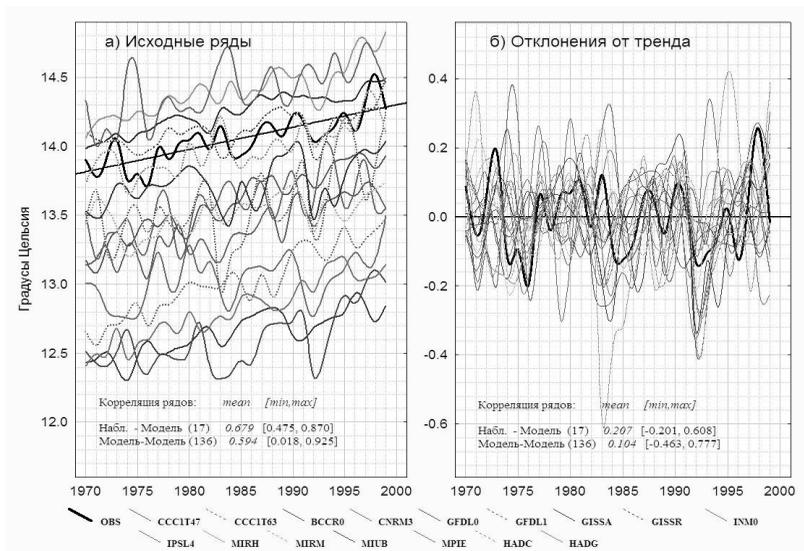


Рисунок 8.2 – Временные ряды глобальной приповерхностной температуры за 1970–2000 гг. по данным наблюдений (черная жирная кривая, данные HadCRUT3) и по результатам 17 моделей (см. легенду): слева – исходные ряды; справа – отклонения от линейного тренда за 1970–2000 гг. В нижней части рисунка приведены оценки корреляции (mean, Min, Max) модельного и наблюдаемого рядов

В целом, как показывает анализ результатов моделирования климата XX века, современные климатические модели воспроизводят основные статистические закономерности климатических изменений, а также те их изменения, которые являются откликом на изменения внешних факторов (рост эмиссии и концентрации парниковых газов и др.). Другими словами, для отдельных характеристик структура полей средних величин, характер межсезонных изменений и тренды воспроизводятся климатическими моделями более или менее удовлетворительно, тогда как межгодовая изменчивость (после исключения тренда) и, по всей видимости, межмесячная изменчивость (после исключения сезонного хода) практически не отражают наблюдаемых изменений. Существенно, что это относится не только к сравнению моделей с наблюдениями, но и к сравнению моделей между собой.

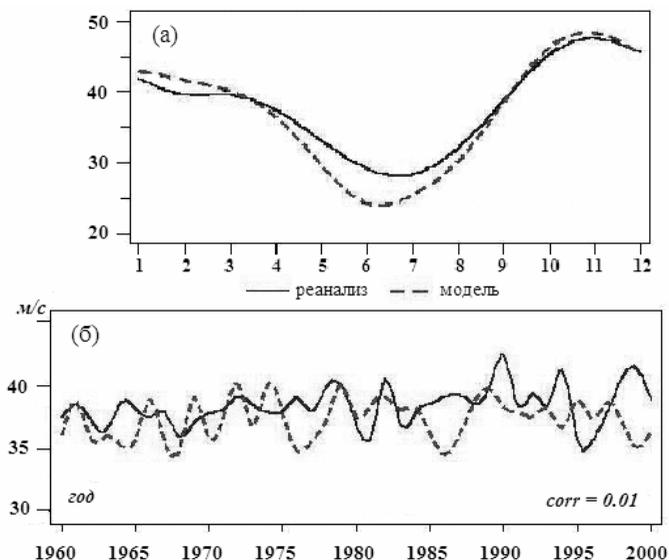


Рисунок 8.3 – Сезонный ход многолетних средних (а) и многолетние изменения (б) индекса зональной циркуляции геострофического ветра в умеренных широтах Северного полушария: сплошная кривая – по данным реанализов NCEP/NCAR; пунктирная кривая – по данным модели INM CM3.0 (ИВМ РАН)

Таким образом, есть основания предполагать существование в климатических моделях феномена предела предсказуемости первого рода, следствием которого является невозможность точного воспроизведения межмесячной и межгодовой изменчивости. Отметим, что представленные оценки относятся к моделям третьего поколения, участвующим в эксперименте CMIP3.

8.2.3. Сценарные прогнозы изменений климата

В настоящее время не существует надежного научного метода прогноза изменения климатообразующих факторов (естественного и антропогенного происхождения) с заблаговременностью 10 – 100 лет. Причина заключается в том, что некоторые факторы недостаточно изучены и пока непредсказуемы (например, вулканы или светимость солнца) или зависят от политических решений (например, развитие энергетики и энергопотребления, что влияет на парниковый эффект).

Поэтому приходится разрабатывать сценарии изменения антропогенных воздействий на климатическую систему и климатообразующие факторы и моделировать отклик климатической системы на соответствующие изменения.

Оценку полученных таким образом изменений климата приходится использовать как «условный» или «сценарный» прогноз (иногда используют термин «проекция», следуя английскому термину «projection», что не соответствует русскоязычной терминологии). Сценарные прогнозы по своей природе имеют вероятностный характер: они отражают только вероятностные свойства и статистическую структуру климатической системы, но не расписание процессов во времени. Результаты моделирования анализируются по многократным прогонам каждой модели (одномодельные ансамбли) и, кроме того, по многократным прогонам многих моделей («мультимодельные» ансамбли, или «суперансамбли»).

На сегодняшний день нет достаточных оснований всецело доверять мультимодельной стратегии в долгосрочном (более 10 лет) прогнозировании изменений климата. Межмодельный разброс оценок существенный, различия чувствительности (изменений равновесной глобальной приповерхностной температуры при удвоении концентрации углекислого газа) рассмотренных моделей слишком велики (от 2,0 до 4,5 °C), и это затрудняет объективный выбор моделей для включения в мультимодельный ансамбль.

Представляется более разумным выбрать модель (или несколько моделей) исходя из оценок успешности в воспроизведении климата на материале прошлого. (Ансамблевый подход приветствуется, но применительно к серии прогонов одной модели.) При этом *процесс верификации модели должен быть отделен от процесса калибровки и должен быть выполнен, как принято в статистике, на независимом материале.*

8.2.4. Стратегический прогноз ожидаемых изменений климата

Стратегический прогноз будущего климата, как правило, дается на несколько ближайших десятилетий с целью обеспечить основу для разработки долгосрочных экономических стратегий и принятия научно обоснованных решений при планировании хозяйственной

деятельности. В качестве одного из возможных подходов представляется целесообразным использовать *регрессионный прогноз* с концентрацией парниковых газов (CO_2) в качестве предиктора (ГР, 2009). Предложенный в этой работе метод подобен использованному С. Манабе и М.И. Будыко (Будыко, 1972) для прогноза изменений глобальной температуры воздуха на предстоящее столетие. Для построения регрессии предлагается использовать период после 1970 г., когда роль антропогенного роста CO_2 в увеличении приповерхностной температуры, по всей видимости, была определяющей. Значения предиктора в течение периода прогноза (для определенности – ближайшее 30-летие) задаются выбранным сценарием.

На рис. 8.4 данный подход реализован применительно к прогнозу изменений пространственно-осредненной температуры (в отклонениях от средней за 1961–1990 гг.) для территории России и Земного шара от 1971–2007 гг. к 2008–2037 гг. На верхнем фрагменте рисунка приведены изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей: до 2007 г. – по данным наблюдений, далее – в соответствии со сценариями МГЭИК (SRES, 2000). Сценарий 20С3М (климат XX века) соответствует реальному (наблюдаемому) изменению концентрации CO_2 в 1901–2000 гг.; остальные сценарии относятся к периоду 2000 – 2100 гг. В сценарии В1 концентрация достигает 550 ppm к 2100 году, после чего стабилизируется; в А1В уровень стабилизации составляет 720 ppm (также в 2100 г.); в сценарии А2 концентрация CO_2 после 2000 года растет при отсутствии мер по стабилизации; в сценарии «committed» концентрация CO_2 остается постоянной на уровне 2000 года. Поскольку в ближайшем 30-летии (период прогноза) различия между сценариями эмиссии CO_2 незначительны (все они указывают на рост концентрации до ~485 ppm), результат должен мало зависеть от выбранного сценария.

В данном случае результаты приведены для сценария SRES А1В (SRES, 2000). Регрессии оценены по данным наблюдений за 1971–2007 гг. Ожидаемое изменение температуры рассчитывается как разность между их средними, т.е. между проекциями средин указанных периодов на ось Y. Тридцатилетия – исходное и прогнозистическое – показаны на рисунке прямоугольниками.

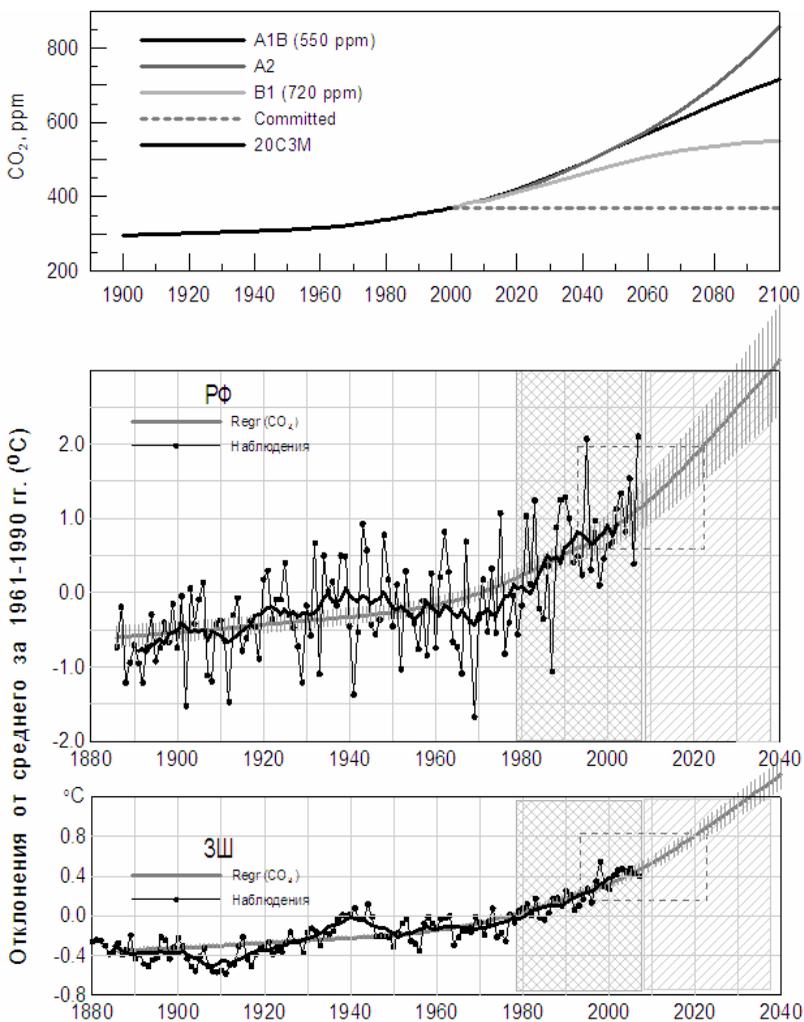


Рисунок 8.4 – Вверху: Изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей (в единицах эквивалентной концентрации CO₂) в сценарных экспериментах по моделированию климата. В середине и внизу: Регрессионный прогноз ожидаемых изменений пространственно-осредненной температуры на 2008–2037 гг. (в отклонениях от средней за 1961–1990 гг.) для территории России и Земного шара соответственно.

Прогноз включает оценку ожидаемого среднего значения и ее 95 %-го доверительного интервала при предписанном (сценарием SRES A1B) изменении концентрации CO_2 на 2008–2037 гг. В соответствии с полученной предварительной оценкой можно ожидать через 30 лет (от 1978–2007 к 2008–2037 гг.) повышения глобальной температуры на $\sim 0,71 \pm 0,06$ °C, а в среднем для территории России – на $\sim 1,4 \pm 0,3$ °C. Относительно базового периода 1961–1990 гг. это потепление означает, соответственно, $0,94 \pm 0,11$ и $2,0 \pm 0,5$ °C. Приведенные оценки относятся к средним 30-летним температурам (нормам) или к серединам указанных 30-летий.

На рис. 8.5 для сравнения данный регрессионный прогноз совмещен со стратегическим прогнозом Росгидромета на основе (Стратегический прогноз, 2005). Последний представлен кривой, соответствующей ансамблевому модельному прогнозу на 2000–2030 гг., а облако вокруг кривой характеризует разброс модельных оценок (оценок разных моделей ансамбля) – в него попали 75 % средних модельных значений. На этом же рисунке синими линиями показан временной ряд наблюдаемой температуры до 2007 г.: ход среднегодовых значений и сглаженных 11-летних (в среднем для России, данные ИГКЭ).

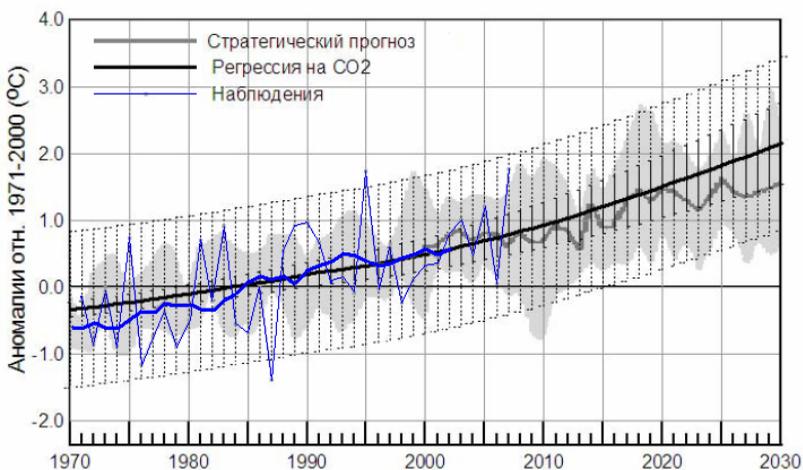


Рисунок 8.5 – Вероятностный регрессионный прогноз (см. рис. 8.4 выше) в сравнении с (Стратегический прогноз, 2005)

В отличие от рис. 8.4, здесь регрессионный прогноз представлен, как и все остальные кривые, относительно базового периода 1971–2000 гг. и, помимо 95 %-го доверительного интервала для средних значений, показан 95 %-й доверительный интервал для индивидуальных значений (точечные отрезки).

По-видимому, можно заключить, что ожидаемые изменения температуры воздуха в этих двух прогнозах по величине близки между собой, хотя после 2020 года регрессионный прогноз ориентирует потребителя на более высокие значения. Следует, однако, отметить, что научно не обоснованные детали межгодовых изменений температуры на кривой стратегического прогноза лучше исключить, чтобы не вводить в заблуждение потребителей. Тем более не обоснованы межгодовые флуктуации применительно к границам доверительных интервалов (границы облака).

8.2.5. Статистическая коррекция модельных прогнозов

Данный подход возможен, если удастся найти «независимый материал» для испытаний и информативные предикторы. Ниже предлагается вариант реализации такого подхода, основанный на устойчивости ошибок моделирования во времени – по крайней мере, для современных моделей и температурных характеристик конца XX столетия на территории России такая устойчивость установлена.

Пусть средние за 1976–2005 гг. представляют «современный климат», а средние за 2006–2035 гг. – «прогнозируемый климат». Предполагается при этом, что доступны модельные оценки обоих климатов – текущего и предстоящего. Следовательно, доступны и модельные оценки ожидаемых изменений климата (разумеется, в рамках возможностей современных моделей и при условии осуществления выбранного сценария изменений факторов).

Задачу прогноза в этом случае можно трактовать как задачу разработки поправок к «базовым» нормам («современный климат») для использования их за пределами базового периода (в условиях «будущего климата»). Для выработки необходимых поправок достаточно, имея данные модельного эксперимента за оба периода (базовый период и период использования «устаревших» норм), рассчитать прогноз изменений норм, т.е. их разность.

Оценки таких поправок, полученные по данным климатической модели ИВМ РАН (Володин, Дианский, 2006) представлены на рис. 8.6 для норм среднегодовой температуры (T_{mean}), годовых минимумов (T_{min}) и годовых максимумов (T_{max}) температуры на территории России и стран СНГ. Эти оценки дают определенное представление о масштабе возможных ошибок, связанных с применением норм конца XX столетия в условиях климата начала XXI столетия в разных регионах России.

Так, более однородная картина отмечается для среднегодовой температуры, для которой можно ожидать (в соответствии с полученными оценками) повышения норм на 1–2 °С на всей территории России (к востоку теплеет больше). Более сложной выглядит картина ожидаемых изменений годовых экстремумов, особенно годовых минимумов. На севере Восточной Сибири экстремально холодные зимы могут стать еще более суровыми, в то время как в европейской части России, в северных и северо-западных районах, и особенно в Краснодарском крае, можно ожидать их весьма существенного смягчения (потепление на 4–5 °С). Что касается годовых максимумов, то в соответствии с этим «прогнозом» для их изменений намечается определенная зональная направленность и, в частности, в центральной полосе европейской части России (южнее Москвы) возможно усиление жарких периодов. Четко прослеживается закономерность: ожидаемое потепление минимумов гораздо более интенсивное, чем максимумов (достаточно сравнить площади областей потепления в полях T_{min} и T_{max}).

Напомним, что представленный на рис. 8.6 «прогноз» изменений норм температуры от 1976–2005 к 2006–2035 гг. (при условии осуществления сценария SRES A2) можно трактовать как рекомендуемые поправки к нормам среднегодовой температуры и годовых экстремумов 1976–2005 гг. для использования их в качестве норм следующего 30-летия.

Интересно проследить, как при таком прогнозе на территории России изменится в следующем 30-летию вероятность высоких температур (рис. 8.7). На верхнем фрагменте приведены модельные оценки 95-го перцентиля годовых максимумов температуры, т.е. температуры, выше которой максимальная (за год) температура наблюдается в среднем в 5 % случаев, или один раз в 20 лет.

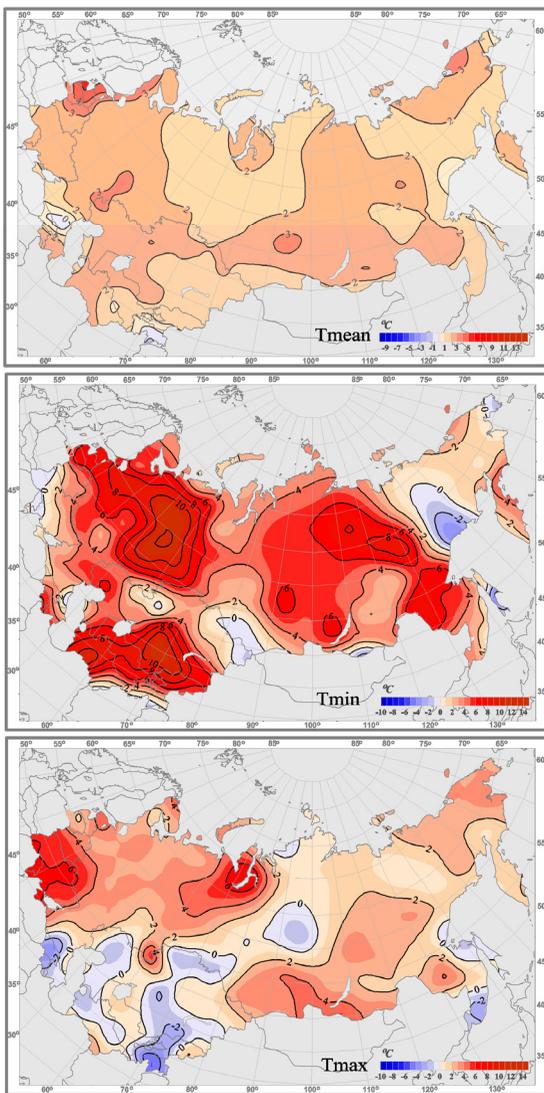


Рисунок 8.6 – Регрессионный прогноз изменения 30-летних норм характеристик температурного режима на территории СНГ от 1976–2005 гг. к 2006–2035 гг. при предписанном сценарии SRES A2 изменения концентрации диоксида углерода: вверху – среднегодовая температура; в центре – годовые минимумы; внизу – годовые максимумы

В соответствии с модельными оценками (рис. 8.7, сверху) значения 95%-х экстремумов температуры на территории России составляют от +20 °С на Чукотке до +40 °С на территории Северного Кавказа. В следующем 30-летии (2006–2035 гг.) в соответствии с используемым сценарным прогнозом повторяемость таких экстремумов должна остаться на прежнем 5 %-м уровне лишь в узкой полосе на севере Европейской территории (рис. 8.7 внизу). В то же время на обширной территории ЕТР и на юге Западной Сибири, где значения 95 %-х экстремумов выше +34 °С (температура теплового удара), следует ожидать осуществления столь жарких лет с вероятностью до 30–40 %.

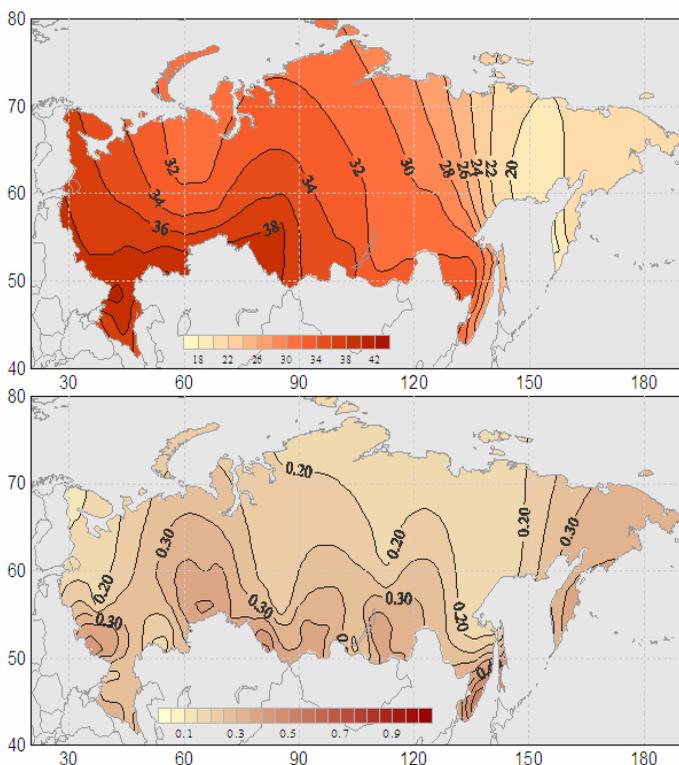


Рисунок 8.7 – Оценки значений 95-го процентиля годовых максимумов температуры на территории России в 1976–2005 гг. (сверху) и ожидаемой вероятности осуществления экстремумов выше этих значений в 2006–2035 гг. (внизу) по данным модели ИВМ РАН при условии осуществления сценария SRES A2

Другими словами, если при современном климате столь жаркие условия осуществляются в 5 % лет, то через 30 лет на этой территории (при условии осуществления сценария SRES A2) их повторяемость может оказаться в интервале от 20 % до более 30 % (и даже 40 %), т.е. в 4–6 раз чаще.

Выводы

В целом, как показывает анализ результатов моделирования климата XX века, современные климатические модели воспроизводят основные статистические закономерности климатических изменений, а также те их изменения, которые являются откликом на изменения внешних факторов (рост эмиссии и концентрации парниковых газов и др.). При этом они не воспроизводят межгодовую (после исключения тренда) изменчивость и межмесячную (после исключения сезонного хода) изменчивость. Таким образом, есть основания предполагать существование в климатических моделях феномена предела предсказуемости первого рода, следствием которого является невозможность точного воспроизведения межмесячной и межгодовой изменчивости.

Существуют определенные принципиальные ограничения возможности прогнозирования климата, и потребителям таких прогнозов необходимо учитывать рекомендации по их использованию на практике. В частности, потребитель должен осознать, что нет оснований рассматривать моделируемые процессы как прогноз на каждый конкретный год, и что модельным прогнозом климата можно пользоваться лишь как климатическим справочником, трактуя прогностические значения как соответствующие статистические характеристики за некоторый достаточно продолжительный период. Например, предложенный выше прогноз климата на тридцатилетие 2006–2035 гг. может рассматриваться в качестве объективного *вероятностного прогноза* на 2015–2016 гг.

Примеры подобных прогнозов для отдельных станций приведены ниже, в разделах 10 и 11. По методике расчета они не отличаются от прогнозов для регионально-осредненных температур. В разделе 11, помимо того, приведены прогнозы для полей температуры в границах заданного региона.

9. ОЦЕНКА ПРЕДСТОЯЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА С УЧЕТОМ РОСТА КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И 60-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

Для научной оценки предстоящих изменений климата необходимо иметь наиболее полную информацию о наблюдаемых изменениях климата, понимать их физические причины и фиксировать регулярные особенности тех изменений, причины которых изучены недостаточно.

Наиболее полный набор глобальных данных о наблюдаемой приземной температуре Земного шара собран в отделе климата Университета Восточной Англии (CRU UEA) под руководством Ф. Джонса (см., например, *Jones et al.*, 2012).

Более подробная информация об этих данных приведена выше, в разделе 2. Напомним, что в них различаются массивы CRUTEM (созданы CRU UEA) и HadCRUT (созданы совместно CRU и Hadley-центр). Первые содержат только данные об аномалиях температуры приземного воздуха на континентах, а вторые совмещают эти данные с данными об аномалиях температуры воды в поверхностном слое океанов. Объединенные данные в массиве HadCRUT получили название «surface temperature» и упоминаются ниже как «приповерхностная температура».

Массивы HadCRUT3 и CRUTEM3 (глобальные поля в 5-градусных «боксах» и глобально-осредненные ряды), базирующиеся только на данных инструментальных наблюдений с 1850 года по настоящее время, использованы в настоящей монографии как основа данных о наблюдаемой приповерхностной температуре Земного шара, полушарий и других крупных территорий. Для некоторых регионов и некоторых отрезков времени использовались более полные данные, если они были доступны и если это было целесообразно. Отметим, что имеются интересные исследования (например, Замолодчиков, 2013), в которых рассматриваются данные за более ранний период (как правило, это палеоклиматические реконструкции), но они менее надежны и в работах авторов монографии не используются.

Временной ряд глобально осредненной приповерхностной температуры HadCRUT3 из этого набора приведен на рис. 9.1 (1850–2011 гг.).

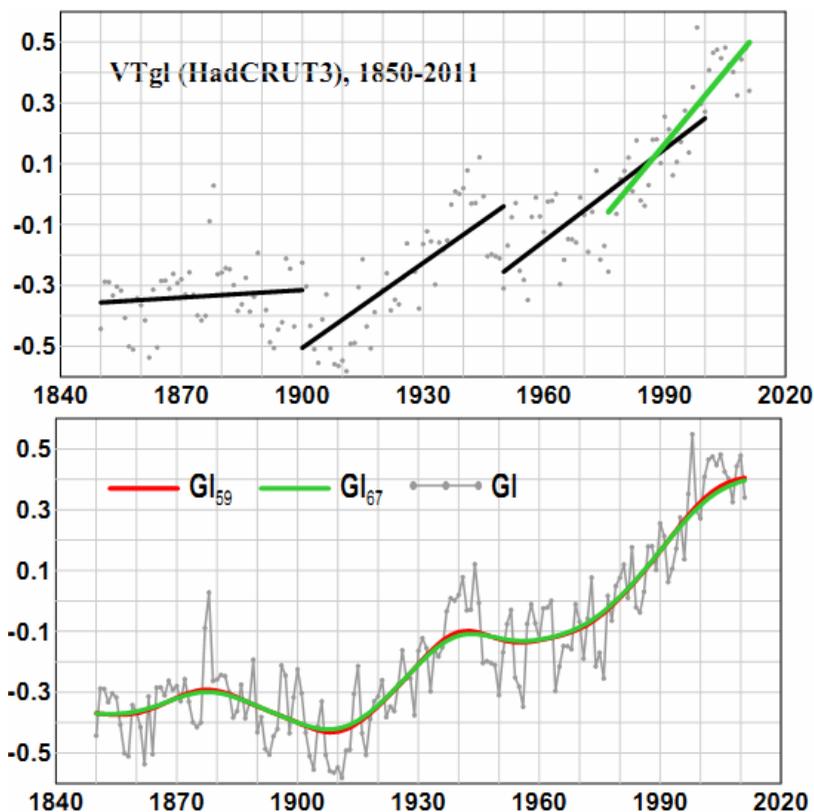


Рисунок 9.1 – Ход аномалий средней годовой глобальной приповерхностной температуры (HadCRUT3)

Вверху: Наблюденные значения (точки) и линейные тренды для 4 периодов: 1850–1900, 1900–1950, 1950–2000 и 1976–2011 гг.

Внизу: Ход наблюдаемых значений (ломаная линия GI); сглаженные кривые (GI₅₉, GI₆₇) получены фильтром Поттера с периодами отсечения 59 и 67 лет

На верхнем фрагменте рис. 9.1 точками показаны аномалии средней годовой глобальной приповерхностной температуры воздуха. Аномалии вычислены как отклонения от среднего за 30 лет (с 1961 по 1990 г.). Рисунок показывает хаотические изменения температур год от года, но отчетливо видно, что линейные тренды для различных отрезков времени показывают малые изменения температуры до 1900-го года и существенное потепление после 1910-го года. Следует обратить внимание, что аномалии среднегодовых температур Земного шара имеют разброс всего 1,2 градуса.

На нижнем рисунке аномалии среднегодовых температур соединены ломаной линией (которая, кстати, не отражает внутригодовых изменений) и показаны сглаженные кривые, полученные с использованием низкочастотного фильтра Поттера с периодами отсечения 59 и 67 лет.

Сглаженные кривые практически полностью совпадают и позволяют выделить два примерно 60-летних колебания от одного максимума до другого: примерно от 1880 до 1940 и от 1940 до 2000 гг. Реальность этих колебаний вполне убедительна. Монотонный рост глобальной температуры после 1910 года не вызывает сомнения и интерпретируется как «глобальное потепление вследствие роста концентрации парниковых газов в атмосфере Земли».

Более детальному анализу изменений глобального потепления и посвящена эта глава.

9.1. Основные причины изменений и изменчивости приземной температуры

В качестве основных физических причин климатической изменчивости приземной температуры ниже рассматриваются:

- изменение концентрации парниковых газов в атмосфере (в данном случае использован временной ряд концентрации CO_2);
- естественная долгопериодная изменчивость (в частности, квази-60-летнее колебание во временных рядах температуры);
- вариации солнечной активности (чаще всего процессы на Земле связываются с числом солнечных пятен и числами Вольфа);

В данной работе из показателей солнечной активности предпочтение отдано числу солнечных пятен (SS, sunspots) как доступному за

более длительный период времени, в среднем за год и для каждого месяца.

Низкочастотные составляющие глобальной температуры с периодами отсечения около 60 лет ($T=59$ и $T=67$), характеризующие естественную долгопериодную изменчивость, приведены на нижнем фрагменте рис. 9.1 и прокомментированы выше. В частности, на кривых четко прослеживается тренд потепления, на фоне которого визуальным образом выделяются три максимума (около 1880, 1940 и 2000 гг.) и два минимума (около 1910 и 1970 гг.).

В процессе исследования были проанализированы аналогичные составляющие глобальной температуры, соответствующие периодам отсечения T от 55 до 69 лет. Анализ выполнен для регионов: земной шар, континенты Северного полушария (СП), арктический пояс, умеренные широты СП и территория России. Отфильтрованные низкочастотные составляющие оказались очень сходными на всем интервале рассматриваемых периодов отсечения. По определению, они должны содержать колебания исследуемого ряда с периодами не ниже периода отсечения (в том числе тренд, если он есть в исходном ряду). На «хвостах» ряда сглаживание, как правило, менее надежно, так как здесь данные не полностью покрывают область сглаживания.

Временные ряды других двух факторов – концентрации CO_2 и числа солнечных пятен (sunspots) – приведены на рис. 9.2.

Красными кривыми показаны их составляющие, выделенные фильтром Поттера с периодом отсечения $T=55$ лет. Характерно, что низкочастотная компонента хода CO_2 практически совпадает с самим рядом, поскольку ряд CO_2 не содержит колебаний с периодами менее 55 лет. Изгиб в конце периода подтверждает сделанное выше замечание относительно большей неопределенности результатов фильтрации на «хвостах» ряда.

Аналогичная составляющая для числа солнечных пятен, по видимому, отражает некоторую тенденцию к уменьшению амплитуды колебаний до 1930 г. и последующие два примерно 20-летних всплеска амплитуды с минимумом между ними в 1970 г. и, возможно, в конце периода.

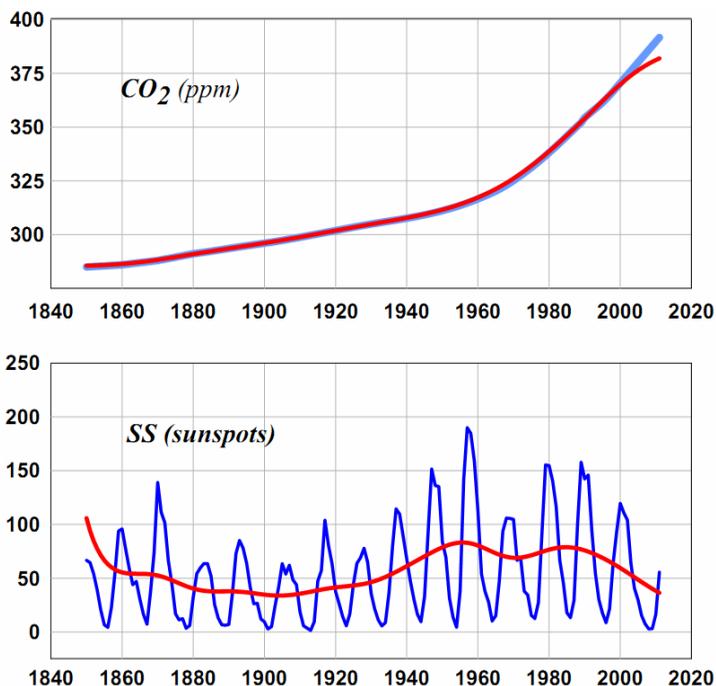


Рисунок 9.2 – Изменение среднегодовых значений концентрации двуокиси углерода (синяя линия,верху) и числа солнечных пятен (синяя линия,внизу) в течение 1850–2011 гг. Красными кривыми показаны компоненты, выделенные фильтром Поттера с периодом отсечения 55 лет

9.2. Анализ откликов приповерхностной температуры в регионах Земного шара на предполагаемые причины изменений

На рис. 9.3 показаны результаты сравнительной оценки вклада предполагаемых физических причин (рост концентрации двуокиси углерода, солнечная активность) и внутренней изменчивости (60-летнее колебание) в изменения среднегодовой глобальной температуры у поверхности (ломаная линия на верхнем фрагменте). На рис. 9.4 и 9.5 аналогичный анализ представлен для средних месячных температур января и июля.

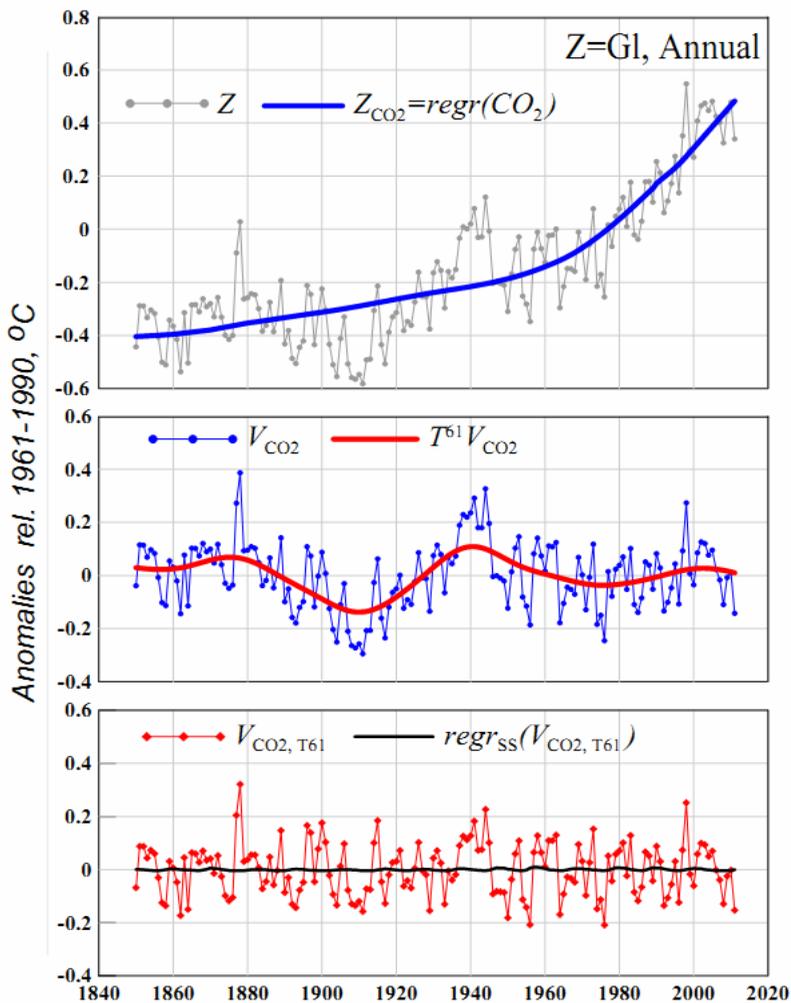


Рисунок 9.3 – Изменение средней годовой приповерхностной глобальной температуры:

Вверху – ход глобальной температуры (Z) и кривая ее регрессии на CO_2 (Z_{CO_2}).

В центре – ход остатков от регрессии ($V_{CO_2} = Z - Z_{CO_2}$) и ее низкочастотная составляющая ($T^{61} V_{CO_2}$);

Внизу – ход $V_{CO_2, T61}$ (из хода температуры исключены компоненты, связанные с CO_2 и с T^{61}) и кривая ее регрессии на число солнечных пятен SS

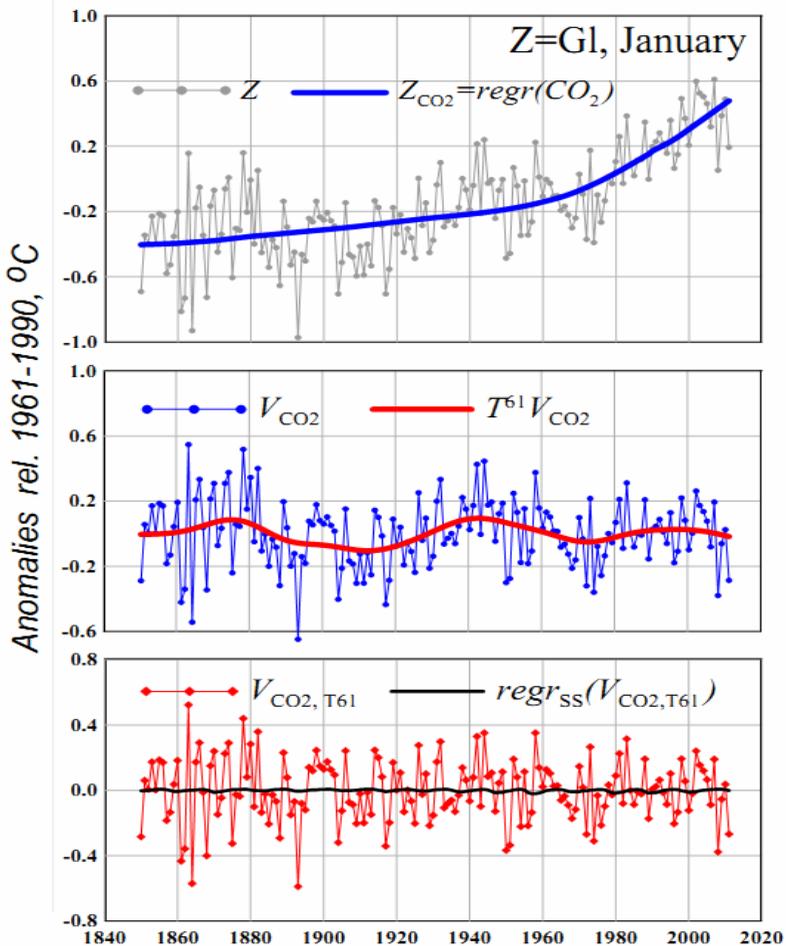


Рисунок 9.4 – См. рис. 9.3, но для среднемесячной температуры января

На рисунках 9.3–9.5 каждая пара кривых одного цвета относится к одному фактору: синие – к фактору CO_2 , красные – к естественной низкочастотной изменчивости, черная кривая – к числу солнечных пятен SS.

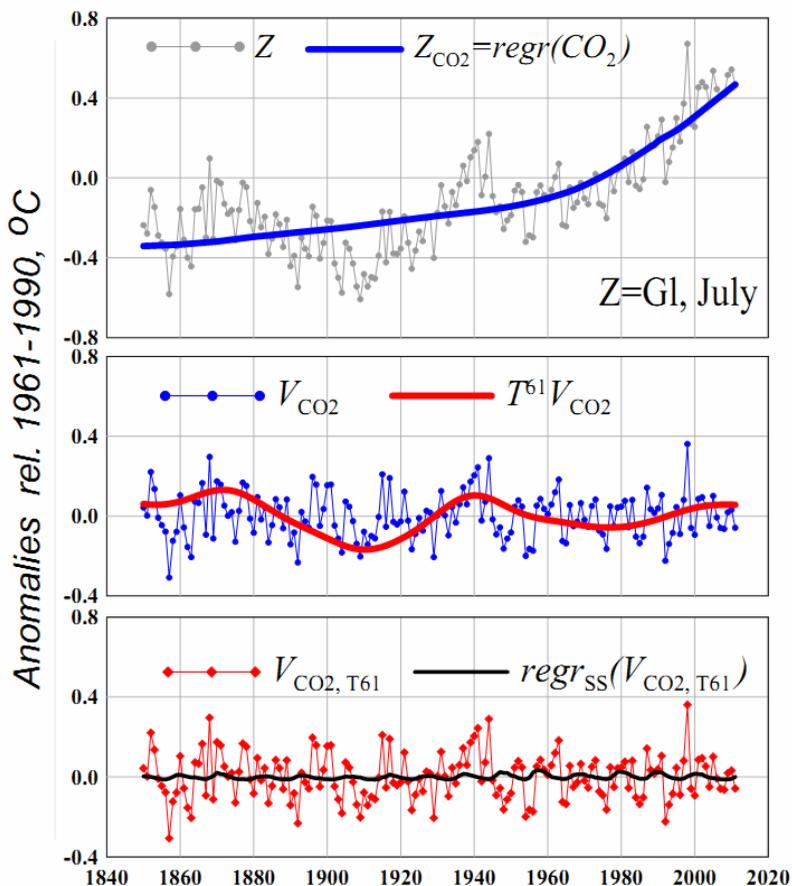


Рисунок 9.5 – См. рис. 9.3, но для среднемесячной температуры июля

Синей кривой на верхних фрагментах показана компонента глобальной температуры Z_{CO_2} , связанная с изменением CO_2 (выделена с помощью регрессии глобальной температуры на CO_2), а на средних фрагментах – временной ряд остатков от регрессии $V_{CO_2} = Z - Z_{CO_2}$.

В этом ряду, не содержащем вклада CO_2 , еще ярче, чем на рис. 9.1, выявляется 60-летнее колебание $T^{61}V_{CO_2}$ – красная кривая на среднем фрагменте, которая получена фильтром Поттера с $T=61$ уже в применении к остаткам от регрессии V_{CO_2} . По-прежнему выделяются три максимума вблизи 1880, 1940 и 2000 гг. и два минимума около

1910 и 1970 гг. Как упоминалось выше, эта кривая практически совпадает с компонентами $T^{55} - T^{65}$, так что их можно рассматривать как вклад «квази-60-летнего колебания» в изменение V_{CO_2} . Соответственно, дисперсия этой компоненты характеризует вклад квази-60-летнего колебания в суммарную изменчивость глобальной температуры, не связанную с изменением CO_2 .

Красная кривая на нижнем фрагменте $V_{CO_2, T61} = V_{CO_2} - T^{61}V_{CO_2}$ представляет остатки после исключения влияния обоих факторов. Этот временной ряд определенно не содержит тренда – в нем остались колебания с периодами менее 60 лет. Попытка связать их с изменением солнечной активности (фактор SS) ничего не дает: кривая регрессии на число солнечных пятен $Regr_{SS}(V_{CO_2, T61})$ практически совпадает с тождественным нулем (*черная кривая* на нижнем фрагменте).

Анализ выполнен также для арктического пояса $65-85^\circ$ с.ш. и пояса умеренных широт $40-65^\circ$ с.ш. Кроме того, выполнено сравнение одноименных оценок, полученных по объединенным данным для континентов и океанов (HadCRUT3) и по данным только для континентов (данные CRUTEM3 и станционные данные для территории России). Количественные результаты выполненного анализа приведены в табл. 9.1 для всех рассмотренных регионов и календарных периодов. Для удобства сравнения оценки выражены в кв. градусах и в процентах от суммарной дисперсии D_Σ . Наглядно данные таблицы представлены в виде диаграмм на рис. 9.6.

Можно видеть, что относительный вклад роста концентрации CO_2 в изменчивость температуры во всех рассмотренных регионах значительно больше, чем влияние 60-летнего цикла. Исключение составляют оценки для континентов Северного полушария (в июле) и Арктического региона (в январе), где вклады этих двух факторов оказались сопоставимыми. Вклад солнечной активности (sunspots) в изменчивость глобальной температуры много ниже (менее 2%). Особо следует отметить, что для территории России практически во всех случаях эти два фактора (концентрация CO_2 и 60-летнее колебание) объясняют менее 50 % изменчивости температуры (а в январе – лишь около 10 %). В январе доля объясняемой этими факторами дисперсии существенно ниже и для других регионов.

Таблица 9.1

**Оценки дисперсии пространственно-осредненных аномалий
приземной температуры и ее составляющих,
связанных с предполагаемыми факторами изменчивости**

Регион	Сезон	D_{Σ}	D_{CO_2}		$D_{T^{61}}$		D_{ϵ}	
			(°C) ²	%	(°C) ²	%	(°C) ²	%
HadCRUT3 (суша+море), 1850-2011								
ЗШ	Год	0,070	0,054	77,4	0,004	5,3	0,012	17,2
	Январь	0,096	0,054	55,7	0,003	3,1	0,040	41,2
	Июль	0,068	0,045	66,1	0,007	9,7	0,017	24,2
65-85N	Год	0,618	0,280	45,3	0,102	16,5	0,236	38,2
	Январь	2,566	0,233	9,1	0,238	9,3	2,095	81,7
	Июль	0,566	0,216	38,1	0,028	4,9	0,322	57,0
40-65N	Год	0,156	0,090	57,8	0,010	6,1	0,056	36,1
	Январь	0,888	0,134	15,0	0,021	2,4	0,734	82,6
	Июль	0,142	0,025	17,3	0,031	22,1	0,086	60,6
CRUTEM3 (суша), 1850-2011								
СП	Год	0,158	0,113	71,2	0,009	5,6	0,037	23,2
	Январь	0,615	0,134	21,8	0,021	3,4	0,460	74,8
	Июль	0,115	0,033	29,0	0,028	24,7	0,053	46,3
65-85N	Год	0,720	0,330	45,8	0,109	15,1	0,281	39,1
	Январь	3,044	0,335	11,0	0,240	7,9	2,468	81,1
	Июль	0,451	0,093	20,7	0,028	6,2	0,330	73,2
40-65N	Год	0,280	0,17	60,1	0,01	3,6	0,102	36,4
	Январь	1,980	0,290	14,7	0,05	2,5	1,641	82,9
	Июль	0,200	0,030	15,6	0,04	20,3	0,128	64,1
БД ИГКЭ (станционные наблюдения), 1886-2011								
Россия	Год	0,583	0,248	42,5	0,013	2,2	0,322	55,3
	Январь	5,026	0,464	9,2	0,107	2,1	4,455	88,6
	Июль	0,378	0,063	16,6	0,030	8,0	0,285	75,4

Условные обозначения: D_{Σ} – полная дисперсия ряда (°C²); D_{CO_2} – дисперсия, объясняемая изменением концентрации CO₂ (дисперсия ряда Z_{CO_2}); DT^{61} – дисперсия, связанная с квази-60-летним колебанием (дисперсия ряда $T^{61}V_{CO_2}$); D_{ϵ} – остаточная дисперсия, характеризующая изменчивость за счет других факторов (включая региональные, такие как чередование синоптических процессов в регионе).

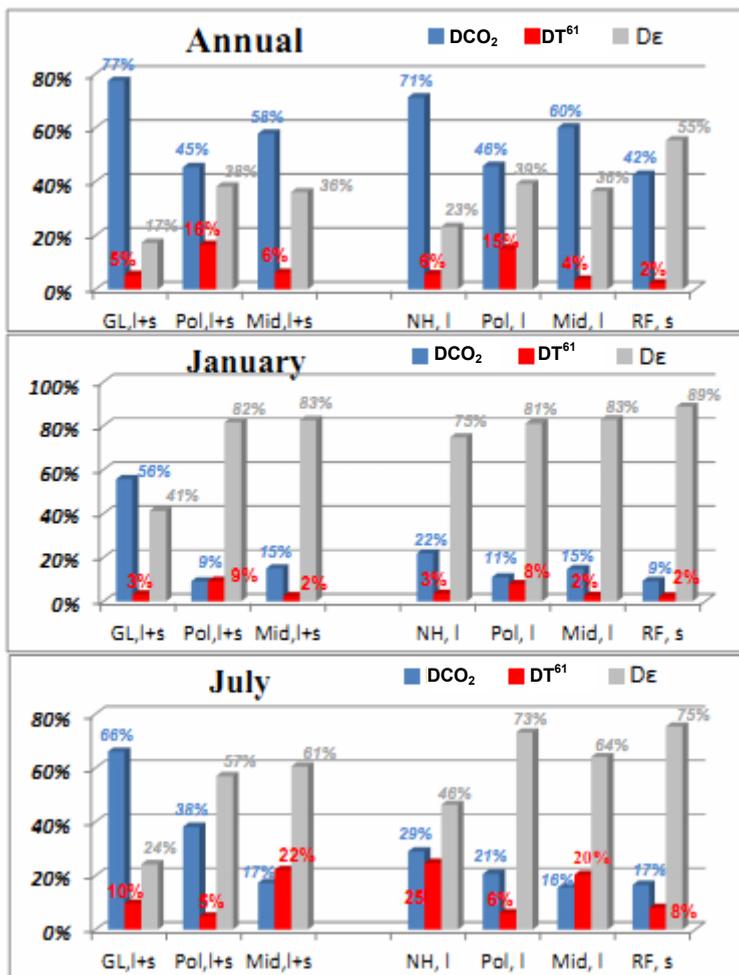


Рисунок 9.6 – Доля дисперсии пространственно-осредненной температуры, объясняемая изменением концентрации CO₂ и квази-60-летним колебанием T⁶¹ для года в целом, января и июля. Серыми столбиками показана остаточная дисперсия Dε.

Обозначения регионов: GL – земной шар, NH – СП, Pol – арктический пояс (65–85N), Mid – пояс умеренных широт (40–65N), RF – Россия; отметка «l+s», «l» и «s» означают «land+sea», «land» и «stations» и указывают используемый для расчетов массив данных (см. три полосы табл. 9.1).

9.3. Оценка (прогноз) ожидаемых изменений квази-60-летней составляющей глобальной температуры

На рис. 9.7 представлен пример численного моделирования глобальной температуры у поверхности за период наблюдений 1901–2005 гг. с использованием 14 моделей (IPCC, 2007, рис. 9.5).

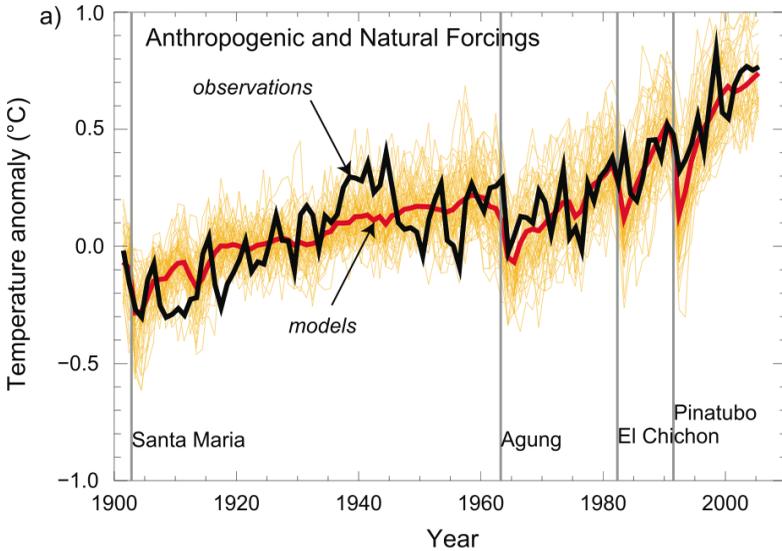


Рисунок 9.7 – Типичный результат численного эксперимента по моделированию средней годовой глобальной температуры у поверхности земли по 58 прогонам 14 моделей за период 1901–2005 гг. (ансамблевая средняя и полоса $\pm\sigma$). Черной ломаной линией показан наблюдаемый ход среднегодовой глобальной температуры за тот же период (Цит. по IPCC, 2007, рис. 9.5)

Данные рис. 9.7 позволяют сделать вывод, что экстремумы квази-60-летнего цикла, обнаруживаемые в рядах наблюдаемой температуры для всех рассмотренных пространственных регионов и сезонов, не воспроизводятся гидродинамическими моделями. Такой вывод позволяет предположить, что эти колебания связаны с внезапными влияниями. Например, это может быть цикл изменения расстояния между Солнцем и Землей вследствие влияния положения крупных планет. В работе (Монин, Берестов, 2005) 60-летний цикл рассматри-

вается как «самый длинный из коротких циклов», в котором «приблизительно повторяется взаимное расположение Солнца, Юпитера и Сатурна».

В любом случае ясно, что учет квази-60-летнего колебания в прогнозе изменений климата пока может быть реализован лишь в виде достаточно грубой эмпирической оценки. При этом речь идет о колебаниях с амплитудой менее 0,2 °С.

Выше было отмечено (рис. 9.3 – 9.5), что изменения средней глобальной приповерхностной температуры складываются из отклика на изменения концентрации парниковых газов и квази-60-летнего цикла, а также хаотических колебаний, связанных с чередованием синоптических процессов.

Рассмотрим одну составляющую этих изменений, а именно: вклад квази-60-летнего цикла, который в данной задаче представлен величиной $T^{61}V_{CO_2}$, т.е. составляющей глобально-осредненной приповерхностной температуры, связанной лишь с 60-летним циклом. На рис. 9.8 ход этой величины в течение 1850–2011 гг. показан черными кривыми для среднегодовой температуры, температуры января и июля (на рис. 9.3 – 9.5 им соответствуют красные кривые на средних фрагментах).

Доступный временной интервал практически не включает восходящую ветвь первого цикла и нисходящую ветвь последнего. Кроме того, следует помнить, что фильтрация на «хвостах» рядов выполнена по неполным данным. В результате, доступны лишь два ~60-летних периода между максимумами (на рисунке они выделены цветными кривыми, розовой и голубой).

Общий характер колебаний в январских, июльских и годовых величинах достаточно близок, хотя в деталях они не совпадают, особенно вблизи последнего максимума. Тем не менее будем считать далее, что различия численных оценок этих колебаний, скорее всего, связаны со случайными ошибками, которых невозможно избежать в оценках такого рода.

Понятно, что двух «реализаций» 60-летнего колебания (т.е. двух имеющихся 60-летних циклов) недостаточно для статистической оценки его следующей «реализации». В этих условиях естественно предложить упрощенное решение по типу «инерционного прогноза» с

той разницей, что в качестве «прогноза» может рассматриваться в равной мере любой из двух наблюдаемых 60-летних циклов. Другими словами, предлагается перенести в точку последнего максимума каждый из двух наблюдаемых циклов. На рис. 9.8 момент последнего максимума на всех кривых показан вертикальной чертой, а подобные каждому циклу «инерционные» изменения температуры показаны кривыми соответствующего цвета.

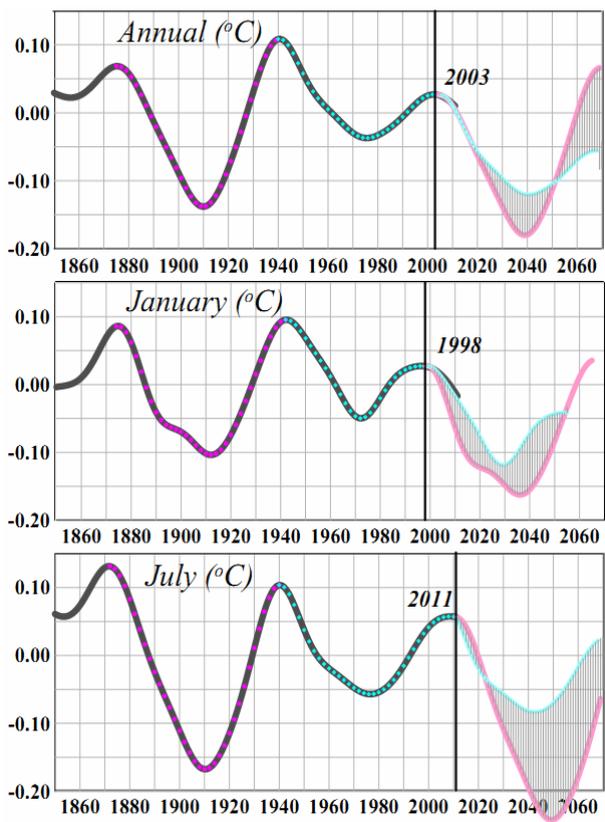


Рисунок 9.8 – Вклад 60-летнего колебания в изменение глобальной приповерхностной температуры в течение 1850–2011 гг. и оценка его изменения в следующем 60-летнем цикле (до 2070 года)

Как следует из приведенных рисунков, можно ожидать, что за счет квази-60-летнего колебания глобальная температура за ближай-

шие 15 лет снизится примерно на $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Принимая гипотезу, что все три графика на рис. 9.8 равнозначны, можно объединить их в один, что сделано и представлено на рис. 9.9.

Этими кривыми можно пользоваться для прогностической оценки ожидаемых изменений средней глобальной температуры за счет квази-60-летнего колебания. Достаточно определить диапазон изменений ординаты (внутри заштрихованной полосы) на вертикали с абсциссой, равной сроку прогноза. Например, к 2040 году можно ожидать уменьшения глобальной температуры только за счет 60-летнего колебания на $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в сравнении с 2010 годом).

Поскольку принята гипотеза о равнозначности всех временных срезов, эта оценка применима в равной мере к средней глобальной температуре любого календарного месяца, сезона и года в целом.

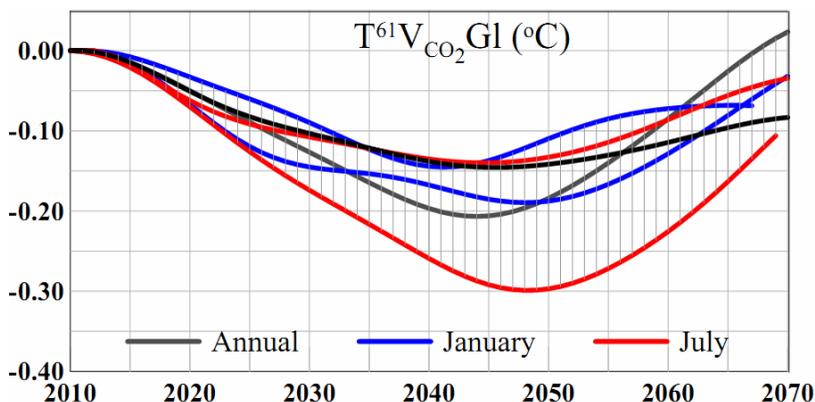


Рисунок 9.9 – Оценка изменения вклада 60-летнего колебания в изменение глобальной приповерхностной температуры в следующем 60-летнем цикле (в течение 2011–2070 гг. относительно уровня 2010 года)

9.4. Суммарная оценка ожидаемых изменений среднегодовой глобальной температуры у поверхности земли

Конечная цель рассматриваемой задачи – формирование сценария изменений глобальной температуры воздуха в ближайшие десятилетия с учетом суммарного воздействия предполагаемых

факторов. Речь идет о сценарии, поскольку предстоящие изменения внешних факторов неизвестны и оценка глобальной температуры основывается на некоторых условных (наиболее соответствующих решаемой задаче) сценариях их изменения. В нашем случае такими факторами являются концентрация парниковых газов в атмосфере и квази-60-летнее колебание. Отклики глобальной температуры на изменение каждого из факторов были исследованы выше и будут использованы здесь для оценки результирующего (суммарного) эффекта, представленной на рис. 9.10.

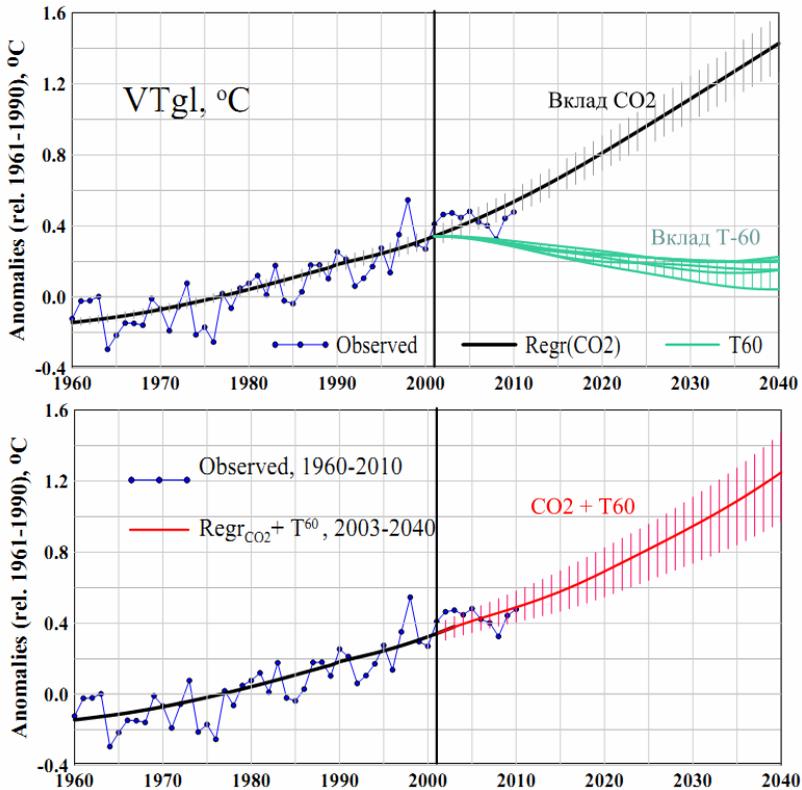


Рисунок 9.10 – Суммарная оценка (прогноз) ожидаемых изменений приповерхностной глобальной температуры на период до 2040 г. с учетом изменения концентрации CO₂ и фазы квази-60-летнего колебания в комплексе (комментарий см. в тексте)

Верхний фрагмент рисунка представляет оценки вклада каждого из факторов, а нижний – суммарную оценку. Чувствительность приповерхностной глобальной температуры к изменению атмосферной концентрации двуокиси углерода, оцененная по эмпирическим данным, приведена в разделе 8. На рис. 8.4 эта оценка в форме регрессионного отклика температуры на изменение концентрации CO_2 использована для получения прогностической оценки ожидаемых изменений температуры до 2040 года. Необходимые для расчета значения регрессора (концентрация CO_2) на период прогноза взяты из сценария A1B МГЭИК (SRES, 2000). На рис. 9.10 данный сценарный прогноз изменения глобальной температуры вследствие изменения концентрации CO_2 воспроизведен на верхнем фрагменте как «вклад CO_2 » и включает оценку ожидаемого среднего значения (черная кривая) и 95 %-го доверительного интервала (вертикальные отрезки серого цвета).

Ожидаемые изменения глобальной температуры, связанные с квази-60-летним колебанием (второй фактор), приведены на рис. 9.9. На рис. 9.10 они изображены как пучок кривых зеленого цвета («вклад T-60»). За точку отсчета принят 2003 год как точка последнего максимума квази-60-летнего колебания для среднегодовых значений глобальной температуры (для разных сезонов она лежит в интервале от 1998 до 2011 г.).

Нижний фрагмент содержит только ход наблюдаемой температуры до 2010 г. включительно и искомую прогностическую оценку предстоящих изменений глобальной температуры до 2040 г. (красная кривая и доверительный интервал). Получена эта оценка суммированием вкладов обоих факторов, показанных на верхнем фрагменте.

Напомним, что полученные оценки относятся к средним 30-летним температурам (нормам) или к серединам соответствующих 30-летий. В соответствии с полученной оценкой можно ожидать через 30 лет (от 1981–2010 к 2011–2040 гг.) повышения глобальной температуры на $0,58 \pm 0,17$ °C, в том числе повышения на $\sim 0,72 \pm 0,11$ за счет роста CO_2 и снижения на $0,14 \pm 0,06$ °C за счет 60-летнего колебания. По отношению к базовому 30-летию 1961–1990 гг. это потепление составит в среднем $0,84 \pm 0,17$ °C.

Выводы

1. Межгодовая изменчивость приземной температуры крупных регионов над сушей больше, чем над океанами; в Арктике больше, чем в умеренных широтах СП; в январе больше, чем в июле и, как правило, растет с уменьшением площади осреднения.

2. Относительный вклад роста концентрации CO_2 в изменчивость температуры во всех рассмотренных регионах значительно больше, чем влияние 60-летнего цикла. На континентах СП (в июле) и в Арктике (в январе) вклады этих двух факторов сопоставимы. Во всех случаях вклад солнечной активности (sunspots) в изменчивость глобальной температуры много ниже (менее 2 %).

3. Экстремумы квази-60-летнего цикла обнаруживаются в рядах температуры для всех рассмотренных регионов и во все сезоны, но не воспроизводятся гидродинамическими моделями. Это позволяет предположить, что цикл связан с внеземными влияниями. Например, это может быть цикл изменения расстояния между Солнцем и Землей вследствие влияния положения крупных планет. Выдвигаются также гипотезы, что причиной могут быть процессы в Мировом океане. Вопрос об учете 60-летнего цикла при прогнозировании ожидаемых изменений климата остается весьма актуальным.

4. Причиной остаточной межгодовой изменчивости De (после исключения воздействий CO_2 и 60-летнего колебания) является, по-видимому, внутренняя изменчивость, включая чередование синоптических процессов на территории региона. Исследование этих процессов является актуальной научной проблемой.

5. Снижение глобальной температуры вследствие 60-летнего колебания в первые 30 лет после точки максимума может составить до $0,20\text{--}0,25$ °C.

6. С учетом влияния обоих факторов (концентрация CO_2 и квази-60-летнее колебание) можно ожидать через 30 лет, от 1981–2010 к 2011–2040 гг., повышения глобальной температуры на $\sim 0,58 \pm 0,17$ °C, в том числе повышения на $\sim 0,72 \pm 0,11$ за счет роста CO_2 и снижения на $\sim 0,14 \pm 0,06$ °C за счет 60-летнего колебания. По отношению к базовому 30-летию 1961–1990 гг. это потепление составит в среднем $\sim 0,84 \pm 0,17$ °C.

10. АНАЛИЗ КЛИМАТА И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ОДНОЙ СТАНЦИИ на примере острова Вайгач¹

Данное исследование выполнено авторами в рамках сотрудничества со Всемирным фондом дикой природы (WWF) России и Министерством образования и науки Российской Федерации в области разработки методических пособий для учителей по вопросам изменения климата. Для изучения выбран остров Вайгач – сравнительно небольшой, изолированный район типично арктической территории, попавшей, согласно имеющимся прогнозам, в зону максимальных воздействий климатических изменений.

Цель исследования – обеспечить более детальные оценки структуры гидрометеорологических полей и процессов и их изменений в пространстве и во времени для конкретных территорий, как непосредственно по данным имеющихся наблюдений, так и с привлечением методов научной оценки их изменений в будущем (прогноз). Результаты также могут быть полезны для специалистов по проблемам адаптации и снижения негативных последствий изменений климата в Арктическом регионе (в том числе, например, для метеорологического сопровождения мегапроекта «Ямал»).

Результаты исследования, по существу, представляют справочник с максимально полным описанием характеристик климатического режима конкретного региона (с использованием практически всех доступных данных наблюдений). Включены также оценки современных тенденций в изменении климата и ожидаемых климатических изменений в ближайшие десятилетия.

В монографию материалы данного исследования включены как пример климатического описания, которое может быть выполнено по данным наблюдений на одной станции (описание локального климата), хотя приведенный фактографический материал и получен-

¹ Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.U02.21.0677) и WWF России.

ные оценки для определенного круга читателей могут представлять и самостоятельный интерес.

В соответствии с направленностью монографии, в полном объеме результаты будут приведены только для характеристик температурного режима острова Вайгач. Будет также приведен перечень других климатических переменных, статистический режим которых (в совокупности с характеристиками температурного режима) предложен в этой работе как описание локального климата, доступное по данным стандартных наблюдений.

Общая характеристика. Основные оценки современного климата и тенденций его изменения на территории острова Вайгач (раздел 10.1) получены авторами по данным гидрометеорологических наблюдений на станции «им. Е.К. Федорова» (индекс по каталогу ВМО – 20946, широта – $\varphi=70,4^\circ$ с.ш., долгота – $\lambda=59,1^\circ$ в.д.). В разделе 2 данной главы использованы материалы и оригинальные разработки авторов (IPCC, 2007).

Станция «им. Е.К. Федорова» оказалась единственной на территории острова, действующей в настоящее время и передающей в соответствии с регламентом телеграммы СИНОП (данные ежедневных и срочных наблюдений) и КЛИМАТ (месячные обобщения ежедневных наблюдений) по каналом ГСТ (Глобальная система телесвязи). Данные этой станции за период 1960–2010 гг. были скомпонованы и протестированы авторами на основе баз данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (<http://www.meteo.ru/>). За полный период 1960–2010 гг. оказались доступны лишь данные об основных климатических переменных (температура приземного воздуха и атмосферные осадки) месячного разрешения. Основу остальной использованной информации составили синоптические данные 8-срочных наблюдений (1977–2008 гг.) и их суточные обобщения (1967–2009 гг.).

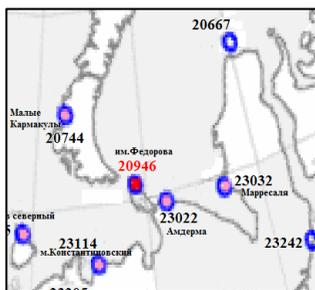
Напомним, что срочные наблюдения проводятся на метеорологических станциях через каждые 3 часа в единые сроки по Всемирному координированному времени 0, 3, ..., 21 UTC (совпадает с временем по Гринвичу GMT). В соответствии с (Наставление, 1985), «метеорологические сутки» отличаются от общепринятых календарных суток и на всех станциях начинаются после 20:00 по местному времени. На станции «им. Е.К. Федорова» начало метеорологических

суток приходится на срок 18 UTC. Полный суточный цикл синоптических наблюдений охватывает, таким образом, наблюдения в сроки: UTC-6, UTC-3, UTC, UTC+3, UTC+6, UTC+9, UTC+12, UTC+15. По местному (локальному) времени наблюдения начинаются в 23:00 предыдущих суток и завершаются в 20:00 текущих. Ниже, в таблицах с детализацией значений исследуемых характеристик по срокам наблюдений время указано по системе Всемирного координированного времени UTC (т.е. 18, 21, 0, 3, ..., 15 UTC).

Следует отметить, что в период с 01.06.2006 г. по 15.04.2007 г. станция работала по программе 4-срочных наблюдений (в сроки 0, 6, 12 и 18 UTC), а в ноябре-декабре 2008 г. и в последние 16 дней 2010 г. (с 1 по 15 ноября) данные наблюдений в базах данных отсутствуют.

Характеристики современного климата приводятся в данной работе для двух 30-летних периодов: 1961 – 1990 и 1981 – 2010 гг. Первый из них выбран как рекомендуемый ВМО базовый период для оценки климатических норм. Поскольку в условиях меняющегося климата (каковым, несомненно, является современный период) эти оценки целесообразно обновлять, в качестве второго периода взято 30-летие, максимально приближенное к текущему моменту. Для полноты дополнительно рассматриваются статистические оценки климатического режима за весь доступный период наблюдений 1960–2010 гг. Для отдельных переменных доступный ряд наблюдений оказался короче – 1977–2008 гг.

Оценки приводятся здесь для года в целом и отдельно для каждого месяца. Более подробная информация о рассматриваемых переменных будет приведена ниже, при описании соответствующих результатов. Для отдельных переменных данные детализированы по срокам наблюдений.



Климат острова Вайгач определяется его расположением за полярным кругом в арктическом поясе России между Баренцевым и Карским морями и между материком и островами Новой Земли на широте, близкой к 70° (см. врезку слева). Координаты острова 70°1'00" с.ш., 59°33'00" в.д., площадь –

3,4 тыс. кв. км. На врезке показано положение острова и расположение гидрометеорологических станций в этом регионе. Единственная из них расположена на территории острова Вайгач – это станция «им. Е.К. Федорова».

Географическое положение острова определяет его арктический (субарктический) климат. Особенностью арктического климата является радиационный режим, характеризующийся неравномерным поступлением солнечной радиации в течение года – полным отсутствием радиации в полярную ночь и увеличенным количеством радиации в полярный день. Эта особенность радиационного режима является фактором, характерным для всего арктического пояса.

Другим важным климатообразующим фактором являются региональные особенности циркуляции на рассматриваемой территории. Для острова Вайгач климатические условия формируются под влиянием крупномасштабной циркуляции, обеспечивающей перенос тепла и влаги из акватории Северной Атлантики, с одной стороны, и вторжениями арктического воздуха из акватории Северного Ледовитого океана – с другой. Чередование атлантических циклонов и вторжений арктического воздуха придают погоде неустойчивый характер в течение всего года.

Несомненное влияние на климат острова Вайгач оказывают водные массы окружающих его арктических морей, определяя некоторые черты, свойственные морскому климату, когда самая низкая и самая высокая температура отмечается не в центральные месяцы зимнего и летнего сезонов, а позднее.

Перечисленные наиболее существенные особенности арктического климата характерны для Арктического региона в целом. Детальное описание климата острова Вайгач представлено ниже, в терминах конкретных статистических оценок, основанных на официальных данных гидрометеорологических наблюдений за последние 50 лет. Как указывалось выше, все приведенные оценки получены авторами по данным наблюдений станции «им. Е.К. Федорова».

10.1. Современный климат

10.1.1. Температура приземного воздуха

В табл. 10.1 приведены многолетние статистические характеристики средней месячной температуры приземного воздуха для двух 30-летних периодов: 1961–1990 и 1981–2010 гг. Среди них – многолетние средние (нормы), стандартные отклонения и экстремумы. Значения среднемесячной температуры каждого индивидуального месяца рассчитаны осреднением среднесуточных значений, в свою очередь полученных осреднением наблюдений за 8 сроков.

Таблица 10.1

Многолетние статистические характеристики средней месячной температуры приземного воздуха по данным двух 30-летий

Величина	Месяцы года											
	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
1961–1990 гг.												
Mean	-18,5	-19,0	-15,9	-12,8	-5,3	0,4	4,7	5,1	3,4	-1,9	-7,9	-12,7
Std	3,9	4,6	4,9	3,7	2,0	1,1	2,0	2,5	1,4	2,0	4,1	4,1
Min	-25,5	-29,9	-26,6	-18,8	-9,6	-1,4	1,0	1,3	0,3	-6,7	-17,7	-21,1
Max	-9,9	-7,8	-8,4	-5,2	-1,1	3,9	8,5	8,8	6,2	1,4	-1,6	-4,4
1981–2010 гг.												
Mean	-17,0	-18,2	-14,1	-11,5	-4,4	1,0	5,2	5,6	3,8	-0,9	-6,8	-12,2
Std	5,3	5,4	3,7	3,8	1,8	1,2	2,0	2,1	1,6	2,2	3,8	3,6
Min	-27,1	-31,7	-21,2	-17,4	-8,0	-1,0	1,0	1,3	-0,5	-7,7	-18,3	-18,6
Max	-6,2	-7,8	-7,3	-2,1	-1,1	3,9	8,9	8,7	6,2	3,4	-0,7	-3,3

Как следует из табл. 10.1, второе 30-летие в среднем оказалось почти на градус теплее первого. При этом в оба периода самая низкая средняя месячная температура отмечается не в январе, а в феврале, а самая высокая – не в июле, а в августе. Средние квадратические отклонения характеризуют масштаб межгодичной изменчивости средних месячных температур в соответствующем периоде. Она

оказалась больше во втором периоде в январе (на 30 %), феврале и сентябре (на 20 %), заметно меньше – в марте и августе (на 20 %) и близка по величине – в остальные месяцы. Экстремальные значения указывают диапазон изменений средней месячной температуры рассматриваемого месяца в течение периода оценивания и согласуются в целом с оценками стандартных отклонений. В них, как и в средних многолетних, во втором периоде обнаруживается смещение экстремумов годового хода на один месяц (в сравнении с первым периодом).

В табл. 10.2 приводятся статистики характеристик температурного режима, рассчитанные по данным за весь доступный период наблюдений 1960 – 2010 гг. для фиксированного месяца. Эти оценки дают более полное представление о современном климате острова Вайгач. Помимо средней месячной температуры, они включают сведения о минимальных и максимальных значениях, наблюдавшихся, соответственно, по минимальному и максимальному термометрам. Содержательное описание включенных в таблицу статистических характеристик дано в каждой строке таблицы. Мнемоническое обозначение расшифровано в примечании.

Самая низкая температура, наблюдавшаяся на станции «им. Е.К. Федорова» в течение 1960–2010 гг., равна $-41,5^{\circ}\text{C}$ (минимум-минимум, или наименьшее показание минимального термометра за доступный период наблюдений). Она зафиксирована 8 февраля 1979 года. Следующие два минимума наблюдались 7.02.1979 г. ($-41,4^{\circ}\text{C}$) и 21.01.1964 г. ($-40,0^{\circ}\text{C}$). Наибольшее за период наблюдений показание максимального термометра (максимум-максимум) равно $27,0^{\circ}\text{C}$ и наблюдалось 12.07.1990 года. Незначительно уступают ему максимумы $26,9^{\circ}\text{C}$ (2.07.1989 г.) и $26,1^{\circ}\text{C}$ (6.07.1964 г.).

Средние из ежегодных минимумов/максимумов для каждого месяца дают более реальное представление о диапазоне колебаний температуры в течение года: от $-32,5^{\circ}\text{C}$ до $+0,4^{\circ}\text{C}$. Центральные три строки таблицы содержат многолетние средние («нормы») за 1960–2010 гг. для значений минимальной (по показаниям минимального термометра), среднесуточной (средней за 8 сроков) и максимальной (по показаниям максимального термометра) температур, предварительно осредненных за каждый месяц.

Таблица 10.2

**Многолетние статистические характеристики
температуры приземного воздуха, °С (1960–2010 гг.)**

Характеристика	Месяцы года											
	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
$\Gamma^y d$ [Тmi]	Самые низкие значения температуры по минимальному термометру за весь период наблюдений											
	-40	-41,5	-37,5	-32,7	-27,7	-11,8	-3,1	-3,2	-5,6	-22,8	-33,3	-37,5
$E^y d$ [Тmi]	Самые низкие значения температуры по минимальному термометру за отдельные годы, осредненные за период наблюдений											
	-31,8	-32,5	-31,4	-26,2	-17	-5,7	-0,6	0,4	-1,6	-10,2	-20	-27,3
$E^y E^d$ [Тmi]	Средние за период наблюдений значения температуры по минимальному термометру											
	-21,4	-21,9	-19	-15,4	-7,6	-1	2,8	3,6	1,9	-3,1	-10,1	-16,2
$E^y E^d$ [Тme]	Средние за период наблюдений значения средней месячной температуры											
	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6	-17,6
$E^y E^d$ [Тma]	Средние за весь период наблюдений значения температуры по максимальному термометру											
	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1
$E^y A^d$ [Тma]	Самые высокие значения температуры по максимальному термометру за отдельные годы, осредненные за период наблюдений											
	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1
$A^y A^d$ [Тma]	Самые высокие значения температуры по максимальному термометру за весь период наблюдений											
	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8

Примечание: Расчет выполняется по выборке ежедневных данных за все годы (y) и все дни (d) фиксированного месяца, сначала – по множеству дней внутри каждого годo-месяца (верхний индекс «d»), затем – по множеству лет (верхний индекс «y»).

Усл. обозначения: I, E, A – статистические операторы: min, mean, max; Tmi, Tme, Tma, - температура: минимальная, средняя и максимальная

Особый интерес представляют статистики годовых характеристик температурного режима, оцененные по данным за 1960–2010 гг. (табл. 10.3). Они показывают, чего можно ожидать в среднем от любого произвольно взятого года.

**Многолетние статистики годовых характеристик
температуры приземного воздуха
по данным за 1960–2010 гг.**

Характеристики годового температурного режима	Многолетние статистики			
	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
Абсолютный годовой минимум (самая низкая за год температура по минимальному термометру)	-34,9	3,2	-41,5	-26,6
Среднегодовой минимум (средняя за год температура по минимальному термометру)	-9	1,8	-12,8	-5
Среднегодовая температура (средняя за год среднесуточная температура воздуха)	-6,2	1,7	-10,4	-2,7
Среднегодовой максимум (средняя за год температура по максимальному термометру)	-3,4	1,6	-7,8	-0,2
Абсолютный годовой максимум (самая высокая за год температура по максимальному термометру)	19,8	4,1	7,7	27
Годовая амплитуда (разность между наибольшим и наименьшим значениями среднемесячной температуры)	27	3,7	19,9	35
Абсолютная годовая амплитуда (разность между наибольшим показанием максимального термометра и наименьшим показанием минимального термометра)	54	5,6	31,7	66,1

Примечание: *mean* – многолетнее среднее; *std* – стандартное отклонение σ ; *min* – минимум; *max* – максимум.

Так, наиболее вероятное значение среднегодовой температуры в рассматриваемом регионе (при современном климате) составляет $-6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, при том что в течение года температура, вероятнее всего, меняется от $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ночные температуры зимой могут опускаться в среднем до $-34,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, но не ниже $-41,5$ и не выше $-26,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогично, наиболее вероятный максимум дневных температур (летом) составляет $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, но колеблется от $19,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значения амплитуды годового хода температуры указывают весь диапазон возможных колебаний температуры в течение года и дают представление о степени континентальности климата в данном регионе (в математике этой величине соответствует термин «размах», или «область изменения» рассматриваемой переменной).

В заключение в табл. 10.4 приведены наиболее вероятные граничные даты устойчивого перехода температуры через некоторые критические значения, имеющие важное прикладное значение.

Таблица 10.4

Критические значения температуры и устойчивые даты перехода через них по данным за 1960–2010 гг.

Критическое значение	Период оценивания	Дата первого перехода	Конец периода	Продолжительность (дни)
0 °С	1961–1990	12 июня	6 октября	117
	1981–2010	06 июня	10 октября	127
	1960–2010	08 июня	07 октября	122
+5 °С	1961–1990	05 июля	17 августа	44
	1981–2010	05 июля	01 сентября	59
	1960–2010	15 июля	23 августа	40

Заметим, что на острове Вайгач устойчивый переход температуры через +10 °С, который принято рассматривать как начало лета, отсутствует. Таким образом, можно считать, что на острове Вайгач лето, как сезон года, отсутствует.

10.1.2. Температура поверхности почвы

В табл. 10.5 приведены средние многолетние значения температуры поверхности почвы, в табл. 10.6 многолетние статистические характеристики (средние и стандартные отклонения) среднемесячной температуры почвы детализированы по срокам наблюдений.

В соответствии с Наставлениями для станций и постов термометры для измерений устанавливаются летом на освобожденной от растительности (оголенной) поверхности почвы, а зимой – на поверхности снега. Данные измерений осреднены по срокам и дням каждого года-месяца и за год, после чего рассчитаны статистические характеристики среднемесячных и годовых значений температуры почвы за доступный период наблюдений (1977–2008 гг.). Таким образом, минимум и максимум означают, соответственно, минимальную и максимальную температуру почвы из всех средних месячных и годовых значений за отдельные годы.

Таблица 10.5

Статистические характеристики средней месячной температуры поверхности почвы (1977–2008 гг.)

Величина	Месяцы года											
	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
Mean	-19,3	-20,1	-16,2	-12,9	-4,6	2,9	7,6	6,5	3,3	-2,2	-8,4	-13,9
Std	4,9	5,5	4,6	4,0	2,2	1,9	2,2	2,2	1,5	2,4	3,9	3,3
Min	-29,9	-34,2	-24,9	-17,9	-10,0	0,0	3,6	3,1	-0,1	-9,6	-21,2	-22,0
Max	-10,6	-8,6	-8,8	-2,4	-0,9	6,8	11,7	10,7	5,9	1,9	-2,0	-8,0

Таблица 10.6

Статистические характеристики средней месячной и годовой температуры поверхности почвы по срокам наблюдений (1977–2008)

Срок (UTC)	Месяцы года											
	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
Многолетние средние												
18	-19,8	-20,2	-17,3	-14,6	-6,2	0,6	4,8	4,3	2,1	-2,3	-8,3	-14,0
21	-19,3	-20,3	-17,2	-15,2	-6,7	0,2	4,3	4,1	1,9	-2,5	-8,4	-14,0
0	-19,5	-20,3	-17,4	-14,9	-6,1	1,1	5,6	4,8	2,3	-2,3	-8,4	-14,0
3	-19,1	-20,1	-16,5	-13,3	-4,5	3,1	8,2	6,8	3,6	-2,1	-8,3	-13,8
6	-19,4	-19,6	-15,5	-11,1	-3,1	5,1	10,6	8,8	5,2	-1,6	-8,2	-13,9
9	-19,3	-19,5	-14,6	-10,2	-2,5	5,8	11,2	9,4	5,3	-1,7	-8,4	-13,9
12	-19,8	-19,9	-15,8	-11,0	-3,1	4,6	9,6	8,0	3,9	-2,1	-8,5	-14,2
15	-19,5	-20,3	-16,6	-13,2	-4,7	2,3	6,8	5,6	2,6	-2,4	-8,5	-14,0
Стандартные отклонения												
18	4,8	5,7	4,6	4,4	2,5	1,4	1,9	2,1	1,5	2,4	4,0	3,3
21	4,9	5,6	4,7	4,4	2,4	1,3	2,1	2,0	1,4	2,4	3,9	3,2
0	4,7	5,6	4,6	4,7	2,5	1,7	2,5	2,4	1,4	2,4	4,0	3,2
3	4,8	5,4	4,7	4,6	2,3	2,3	3,0	2,9	1,9	2,4	3,9	3,2
6	4,8	5,4	4,2	4,0	2,1	2,8	3,1	2,9	2,0	2,5	4,0	3,4
9	5,0	5,4	4,4	3,5	2,0	2,9	2,8	2,7	1,7	2,5	3,9	3,3
12	4,7	5,5	4,5	3,7	2,2	2,8	2,7	2,6	1,8	2,4	4,0	3,4
15	5,0	5,6	4,7	4,0	2,5	2,1	2,2	2,3	1,5	2,4	4,0	3,4

Табл. 10.7 содержит осредненные за 1977–2008 гг. ежегодные месячные значения температурных экстремумов. Минимальные и максимальные температуры фиксируются, соответственно, по минимальному и максимальному термометрам в каждый из сроков наблюдений и в каждый 3-часовой интервал между сроками. По этим данным за каждый день были выбраны минимальная и максимальная температуры, которые затем были осреднены по дням каждого месяца отдельных лет и за период наблюдений. Из всех ежедневных минимумов (максимумов), кроме того, был выбран наименьший (наибольший) для каждого месяца – это абсолютные месячные минимум и максимум температуры почвы на данной станции.

Таблица 10.7

**Многолетние характеристики минимальной
и максимальной температуры поверхности почвы
(1977–2008 гг.)**

Величина	Месяцы года											
	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
Mean min	Средний минимум											
	-23,4	-24,1	-20,5	-17,5	-8,0	-0,6	3,3	3,1	0,9	-4,2	-11,5	-17,8
Abs min	Абсолютный минимум											
	-33,4	-37,4	-29,7	-23,4	-12,8	-3,1	0,1	-0,2	-2,5	-12,2	-23,9	-26,4
Mean max	Средний максимум											
	-15,6	-16,1	-12,1	-8,3	-1,4	7,5	13,7	11,3	6,8	-0,3	-5,9	-10,5
Abs max	Абсолютный максимум											
	-7,2	-5,8	-4,9	-0,8	2,6	13,7	19,5	16,3	10,4	4,3	-0,8	-5,2

Выводы

- Минимум в годовом ходе температуры поверхности почвы отмечается в феврале, а максимум – в июле (на это согласованно указывают как средние температуры, так и экстремальные).

- В июле, июне и августе средняя температура поверхности почвы выше средней температуры воздуха. Почва удерживает тепло!

- Межгодовая изменчивость (стандартное отклонение) температуры почвы максимальна зимой и меньше летом.

- Абсолютный максимум температуры поверхности почвы отмечен в июле (+19,5 °С), и он меньше абсолютного максимума температура воздуха 27,0, который также был отмечен в июле.

- Абсолютный минимум температуры поверхности почвы выше абсолютного минимума температуры воздуха, которые были отмечены в феврале.

- Суточный ход температуры поверхности почвы (изменение по срокам) в зимние месяцы незначителен, но уже в мае температура поверхности почвы в 09 UTC более чем в два раза выше, чем в 21 UTC (соответственно, в 14 и 02 часа по местному времени).

Следует подчеркнуть увеличение размаха (амплитуды) суточного хода с приближением к летнему сезону.

Учитывая направленность настоящего издания, содержание остальных разделов климатического описания здесь не приводится. Отметим лишь, что эти разделы включают оценки статистического режима для климатических переменных: ветер, влажность воздуха, атмосферные осадки, облачность.

10.2. Современные тенденции в изменении климата: температура приземного воздуха

Временной ряд среднегодовой температуры приземного воздуха на станции «им. Е.К. Федорова» приведен на рис. 10.1, а его многолетние статистики (включая оценки линейного тренда) – в табл. 10.8.

Таблица 10.8

Многолетние статистические характеристики средней годовой температуры приземного воздуха

Характеристика	Период	Значение	Дата
Среднее значение	1960–2010	-6,25 °С	
Стандартное отклонение		1,70 °С	
Минимальное значение		-10,4 °С	2008
Максимальное значение		-2,7 °С	1998
Коэффициент линейного тренда	1976–2010	0,56 °С/10 лет	
Доля учтенной дисперсии		10,4 %	

Таким образом, в изменении температуры в течение 1976–2010 гг. обнаруживается тенденция к потеплению со средней скоростью 0,56 °С/10 лет. Тренд ответствен за 10,4 % суммарной межгодовой изменчивости, что соответствует уровню значимости $\alpha=2,9\%$.



Рисунок 10.1 – Изменение среднегодовой температуры приземного воздуха на станции «им. Е.К. Федорова» за период 1960 – 2010 гг. Усл. обозначения см. в легенде

10.3. Оценка предстоящих изменений климата

Для оценки предстоящих изменений климата рассматриваемого локального региона в настоящий момент авторам доступны лишь весьма ограниченные прогностические материалы Четвертого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2007) и собственные оценки, которые следует рассматривать как предварительные и выражающие личное мнение авторов.

Выше (раздел 8) уже отмечалось, что все прогнозы будущих изменений климата опираются на гипотезу о сценарии изменения состава парниковых газов в атмосфере. Обычно используется несколько сценариев, предусматривающих разные масштабы выбросов – от малых до больших. Модели примерно воспроизводят изменения температуры за период наблюдений и позволяют оценить различие между сценариями, но разброс результатов для каждого сценария весьма велик, хотя в целом они согласованно указывают на продолжение потепления как на наиболее вероятную перспективу

предстоящих десятилетий. Ниже предложен прогноз характеристик температурного режима острова Вайгач (рис. 10.2) на основе регрессионного подхода, описанного в разделе 8.

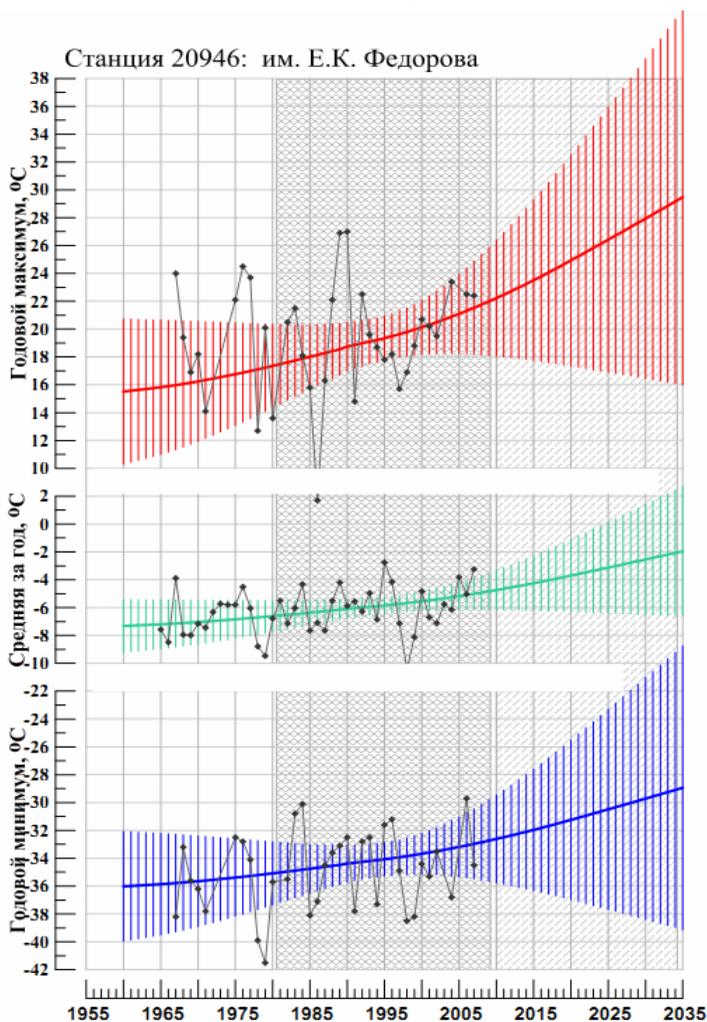


Рисунок 10.2 – Регрессионный прогноз среднегодовой температуры (в центре), годового максимума (вверху) и годового минимума (внизу) температуры с использованием концентрации диоксида углерода в качестве регрессора для станции «им. Е.К.Федорова»

В данном случае период прогноза – тридцатилетие 2010–2039 гг., период оценки регрессии – предшествующее тридцатилетие – 1980–2009 гг. Черная ломаная линия показывает наблюдения; гладкая кривая – линия регрессии; вертикальные отрезки – 95 %-й доверительный интервал предсказанного среднего значения. Для построения прогностического уравнения использованы доступные данные наблюдений о температуре воздуха на станции «им. Е.К.Федорова» и о глобальной концентрации диоксида углерода до 2010 года. Данные об изменении концентрации CO₂ на период до 2040 г. были взяты из сценария SRES A1B МГЭИК (SRES, 2000).

Использование полученной регрессии для оценки температуры воздуха до 1980 г. (эпигноз) показало удовлетворительное совпадение прогностических значений с наблюдавшейся температурой, что согласуется с выводом о ведущей роли диоксида углерода в современном глобальном потеплении (с конца XIX столетия).

Можно ожидать, что в районе острова Вайгач годовые максимумы будут повышаться несколько быстрее, чем годовые минимумы, так что годовая амплитуда температур может увеличиться. Доверительный интервал полученных оценок очень широк, особенно для годовых максимумов (т.е. для экстремально жарких летних условий). В среднем, в соответствии с данным прогнозом и при условии осуществления сценария SRES A1B для роста концентрации CO₂, к середине 2030-х гг. можно ожидать повышения температурной нормы в этом районе примерно на 3 °С. Однако, с учетом неопределенности, эта оценка может колебаться в интервале от -1 °С до +7 °С.

11. АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ АЛТАЕ-САЯНСКОГО ЭКОРЕГИОНА

Исследование изменения климата в российской части Алтае-Саянского экорегиона (АСЭ) выполнено авторами в рамках подготовки WWF Оценочного доклада «Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона» (WWF, 2011), цель которого – создать информационную базу для будущих работ, направленных на исследование последствий климатических изменений и планирование адаптационных мер. Спрос на надежную климатическую информацию, необходимую для планирования действий по адаптации к изменению климата и для разработки методов смягчения последствий и управления рисками, растет в настоящее время со стороны самых разных потребителей. Обслуживание информацией о климате объявлено Третьей всемирной климатической конференцией (2009) одной из важнейших задач гидрометеорологии, а в 2011/2012 г. стартовал проект ВМО «The Global Framework for Climate Services GFCS» (WMO-1374-SG-CER-MFA). В русском переводе проект получил название «Глобальные рамочные основы климатического обслуживания (ГРОКО)».

Результаты предлагаемого исследования (РГ, 2011) содержат углубленные данные о современном климате АСЭ, его наблюдаемых изменениях и оценках ожидаемых изменений климата в будущем. Такая информация является базовой для принятия решений по мерам адаптации природных экосистем к изменениям климата. Ниже будут воспроизведены полученные оценки и фактографические данные, касающиеся только температурного режима АСЭ.

Основные оценки получены авторами непосредственно по продолженным до текущего времени данным гидрометеорологических наблюдений на станциях государственной наблюдательной сети Росгидромета. Дополнительно использованы расчетные исторические данные (в том числе временные ряды индексов изменчивости и экстремальности климата) из базы климатических данных ИГКЭ

Росгидромета и РАН. Во втором разделе использованы материалы Четвертого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2007).

На рис. 11.1 приведена наблюдательная сеть станций, использованных в данной работе. В частности, здесь показано размещение 518 российских станций с доступными данными месячного разрешения и 150 станций с доступными данными ежедневных наблюдений.

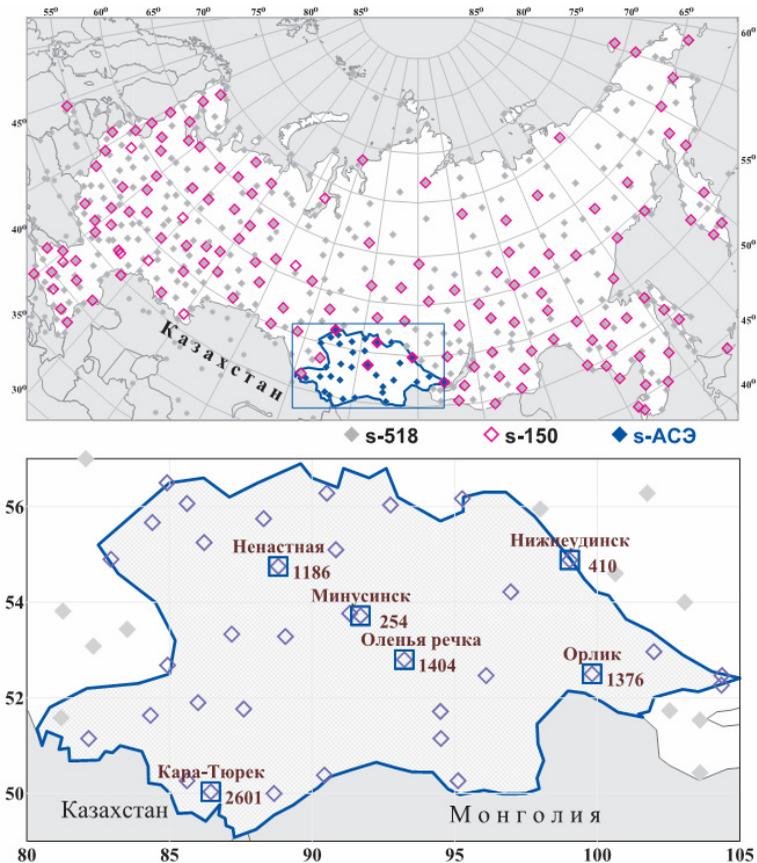


Рисунок 11.1 – Используемая сеть метеостанций на территории России с данными месячного (s-518) и суточного (s-150) разрешения. Станции на территории Алтае-Саянского экорегиона (s-ACЭ) воспроизведены ромбами на нижнем рисунке

Регион, охватывающий территорию Алтае-Саянского экорегиона (см. синий прямоугольник на верхнем рисунке), воспроизведен в укрупненном масштабе на нижнем рисунке. Станции, для которых приведены локальные климатические данные, обведены квадратом. Для них на рисунке указаны имя станции и высота над уровнем моря (в м).

11.1. Современный климат экорегиона

Для характеристики современного климата в данной работе принят период 1976–2005 гг. – последнее 30-летие, завершающееся годом, кратным 5. Как указывалось выше, в соответствии с рекомендациями ВМО в настоящее время базовым периодом для оценки климатических норм все еще считается период 1961–1990 гг. Однако представляется, что в условиях меняющегося климата (каковым является современный период) эти оценки целесообразно обновлять каждые 5 лет.

Пространственные распределения многолетних средних (климатических норм) различных климатических переменных приведены ниже, на рис. 11.2 – 11.4. Они расширяют представления о современном климатическом режиме на территории России и более детально – на территории АСЭ. Оценки, по возможности, приведены здесь для года в целом и для центральных месяцев экстремальных сезонов – января и июля.

Климат Алтае-Саянского региона определяется его расположением вблизи центра материка, удаленностью от океанов и особенностями рельефа (следовательно, и циркуляции), которые обуславливают разнообразие местных климатов с ярко выраженной континентальностью, особенно в южных районах. Характерной особенностью циркуляции в регионе является преимущественно западный перенос, который на высоте 1000–2000 м преобладает в течение всего года. Расположенный непосредственно к югу от региона центр зимнего Азиатского антициклона обуславливает продолжительную и холодную зиму с выраженными температурными инверсиями в межгорных котловинах (температура в котловинах заметно ниже, чем на склонах гор). При ослаблении Азиатского антициклона часто отмечаются прорывы южных циклонов с сопутствующими оттепелями, усилением ветра и сильными снегопадами. Резкие похолодания обычно связаны с вторжениями арктических приземных антициклонов, которые проникают в регион в тылу ныряющих с Таймыра циклонов. Вторжения такого рода антициклонов усиливают Азиат-

ский антициклон, и над регионом на продолжительное время устанавливается сухая и морозная погода. По мере прогревания континента приземное давление падает и Азиатский антициклон разрушается. Летом у поверхности земли к югу от региона формируется Переднеазиатская термическая депрессия и более выражена циклоническая деятельность.

На рис. 11.2 приведено пространственное распределение норм среднегодовой температуры на территории России в целом и отдельно (внизу) на территории АСЭ.

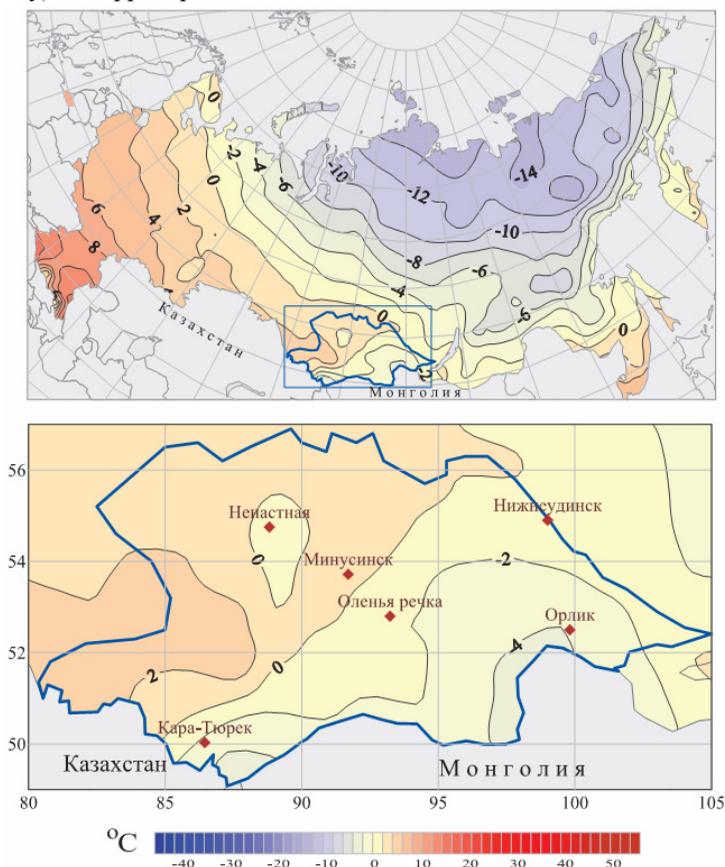


Рисунок 11.2 – Среднегодовая температура приземного воздуха на территории России и Алтае-Саянского экорегиона: климатические нормы 1976–2005 гг.

Можно видеть, что на территории АСЭ температура убывает с запада на восток (как на всей территории России). В среднем за год теплее всего на юго-западе, в Алтайском крае (среднегодовая температура выше $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$); наиболее холодно – на юге и юго-востоке (среднегодовая температура ниже $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Интересно отметить, что довольно большую часть территории АСЭ вдоль всей южной границы занимает область со среднегодовой температурой ниже $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в основном на юге Республики Бурятия, Республики Тыва и Республики Алтай (такие области среди прикладных климатологов принято считать не пригодными для круглогодичных производств и постоянного проживания).

На рис. 11.3 представлены пространственные особенности температурного режима в январе и июле. В западной части АСЭ теплее, чем в восточной, в оба сезона (как и за год в целом).

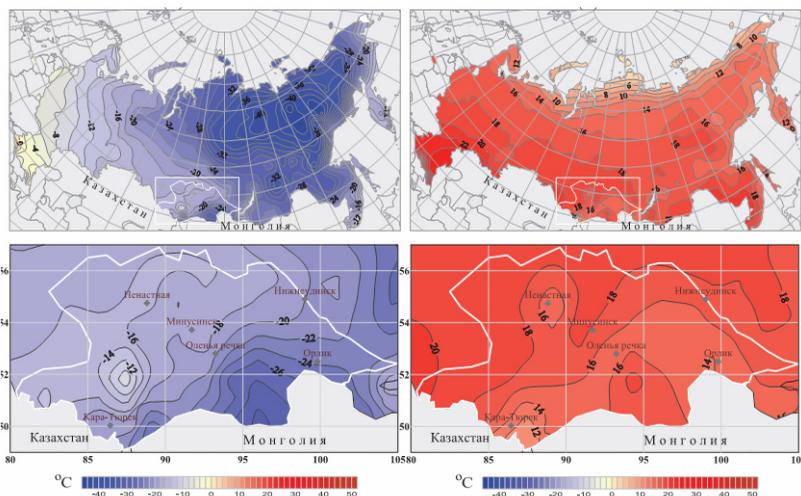


Рисунок 11.3 – Среднемесячная температура приземного воздуха на территории России и Алтае-Саянского экорегиона в январе (слева) и июле (справа): многолетние средние за 1976-2005 гг.

Средняя за 1976–2005 гг. январская температура меняется от $-10\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в предгорьях Горного Алтая до $-25\dots-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в котловинах Чуйской «степи» и Восточного Саяна. Именно здесь, в Восточном Саяне, отмечается самое южное расположение вечной мерзлоты. Лето в горах короткое и прохладное, температура июля на высоте 1000 м не превышает $+14\dots+16\text{ }^{\circ}\text{C}$, но в закрытых котловинах,

где воздух застаивается, как, например, в районе Минусинска, может достигать +18 °С и выше. В целом средняя многолетняя июльская температура (норма) меняется от +18 ...+20 °С на северо-западе АСЭ до +12 ...+15 °С на юге Республики Алтай и в Бурятии. Можно отметить дополнительно, что поле июльских температур в целом более гладкое, чем январских, по-видимому, за счет орографии и связанных с ней особенностей зимней циркуляции. Значительный перепад зимних и летних температур, увеличивающийся с запада на восток (от 30–32 до 40 °С и более), свидетельствует об увеличивающейся к востоку континентальности климата.

Характеристику температурного режима АСЭ дополняет рис. 11.4, на котором представлены пространственные распределения средних многолетних значений за 1976–2005 гг. для годовых температурных минимумов и максимумов на территории экорегиона. Здесь еще более четко проявляется влияние орографии зимой (повышенная градиентность поля зимних минимумов, включая инверсию температуры в области Минусинской котловины) и резко континентальный характер климата (контраст между летним максимумом и зимним минимумом на всей территории составляет более 70 °С).

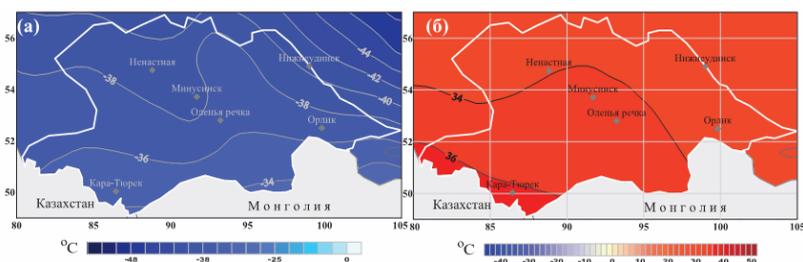


Рисунок 11.4 – Годовой минимум (а) и годовой максимум (б) температуры приземного воздуха на территории Алтае-Саянского экорегиона: многолетние средние за 1976-2005 гг.

Оценки в таблице 11.1 получены по данным наблюдений за 1976–2005 гг. Станции выбраны так, чтобы они представляли разные физико-географические условия (см. рис. 11.1). Статистические характеристики включают: mean – многолетнее среднее; std – стандартное отклонение σ ; min – минимум; max – максимум; p10 – 10-й процентиль (значение переменной, ниже которого во временном ряду было 10 % случаев); p90 – 90-й процентиль (ниже этого значения были 90 % всех случаев). При длине ряда 30 лет лишь три значения были ниже p10 и выше p90.

Таблица 11.1

**Статистические характеристики среднемесячной температуры
приземного воздуха, °С (1976–2005 гг.)**

Станция	Месяц	Статистические характеристики					
		Mean	Std	Min	Max	P10	P90
Нижеудинск	Год	-0,5	0,9	-2,2	1,2	-1,7	0,8
	I	-20,5	3,7	-28,2	-11,4	-25,3	-16,0
	VII	17,7	1,5	14,7	20,6	15,7	19,4
Ненастная	Год	-1,7	0,9	-4,6	-0,3	-2,9	-0,7
	I	-15,1	2,9	-21,1	-10,3	-20,1	-10,8
	VII	13,4	1,5	10,9	16,2	11,1	15,4
Минусинск	Год	1,8	0,9	0,0	3,5	0,3	2,9
	I	-17,7	3,9	-26,7	-6,9	-21,6	-13,1
	VII	19,9	1,3	17,6	22,5	18,4	21,6
Оленья речка	Год	-2,7	0,7	-4,4	-1,3	-3,8	-1,9
	I	-17,5	2,4	-23,5	-13,2	-20,9	-14,4
	VII	12,5	1,3	10,4	15,5	10,7	14,1
Орлик	Год	-4,4	0,8	-5,9	-2,8	-5,6	-3,5
	I	-23,6	3,0	-30,3	-17,1	-27,3	-19,7
	VII	13,4	1,2	11,0	16,1	11,7	15,2
Кара-Тюрек	Год	-5,3	0,8	-7,5	-3,4	-6,3	-4,4
	I	-16,1	2,5	-21,5	-11,8	-19,6	-12,7
	VII	7,2	1,2	4,5	9,5	5,8	8,7

В завершение данного раздела приведем сезонный ход статистик температуры, осредненной по территории АСЭ (рис. 11.5). На верхнем фрагменте показан внутригодовой (сезонный, от месяца к месяцу) ход статистик пространственно-осредненной по региону АСЭ температуры за 1976–2005 гг.

Прямоугольник на рисунке соответствует интервалу $\pm\sigma$ относительно среднего (нормы), а крайние точки вертикальных отрезков – экстремальным значениям среднемесячных температур в течение рассматриваемого периода.

Можно видеть, что внутрigoдовой размах температур (в среднем для территории АСЭ) составляет более 45 °С, а межгодоичная изменчивость (σ) очень меняется от месяца к месяцу (от 7,2 °С в феврале до 17,1 °С в сентябре). Такой масштаб колебаний температуры характерен для резко-континентального климата.

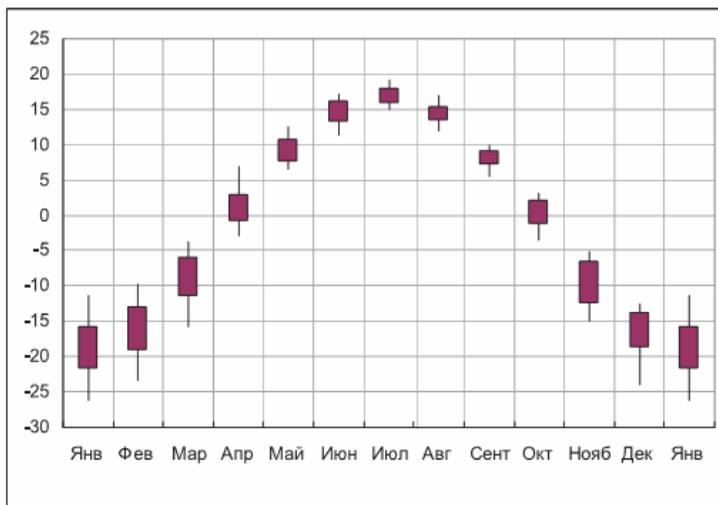


Рисунок 11.5 – Сезонный ход многолетних статистик среднемесячной температуры приземного воздуха, пространственно-средней по территории АСЭ (1976–2005 гг.)

11.2. Современные изменения климата по данным наблюдений

Глобальная приповерхностная температура вычисляется как средняя из температур приземного воздуха над континентами (на высоте 2 м над поверхностью) и температур воды поверхности морей и океанов. Для пространственного осреднения используются не сами температуры, а их аномалии, т.е. отклонения от средних величин за выбранный базовый период. Такие ряды приведены на рис. 11.6 для приповерхностной температуры Земного шара, территории России и АСЭ.

При анализе изменений климата по данным инструментальных наблюдений, как подчеркивалось выше, особое внимание уделяется анализу трендов за период с 1976 года, поскольку этот период в

большой мере характеризует антропогенное влияние на современный климат.

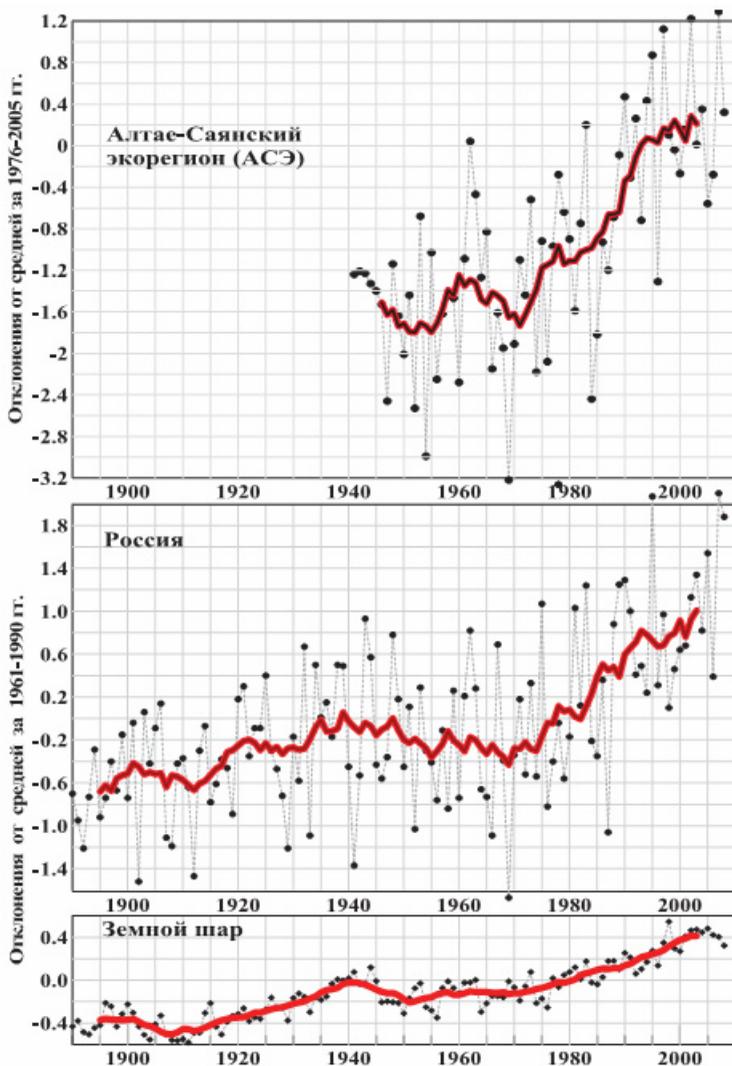


Рисунок 11.6 – Временные ряды пространственно-средненных значений среднегодовой приповерхностной температуры Земного шара, России и Алтае-Саянского экорегиона. Красные кривые – результат 11-летнего скользящего сглаживания

На рис. 11.7 повторен временной ряд пространственно-осредненной (по территории АСЭ) среднегодовой температуры приземного воздуха, на котором дополнительно показан тренд за 1976–2008 гг. и норма базового периода 1976–2005 гг. На рисунке приведены также числовые значения нормы (N_{rm}) и оценок линейного тренда (b – коэффициент тренда, D – доля учтенной дисперсии), в соответствии с которыми средняя скорость потепления в течение 1976–2008 гг. составила $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, что весьма существенно, учитывая вклад в дисперсию $37,4\%$.



Рисунок 11.7 – Изменение среднегодовой температуры приземного воздуха, осредненной по территории АСЭ (1941 – 2008 гг.)

Более детальное представление о пространственных особенностях современных тенденций в изменении температуры и осадков дает рис. 11.8, на котором представлены пространственные распределения локальных коэффициентов линейного тренда, оцененные непосредственно по станционным данным.

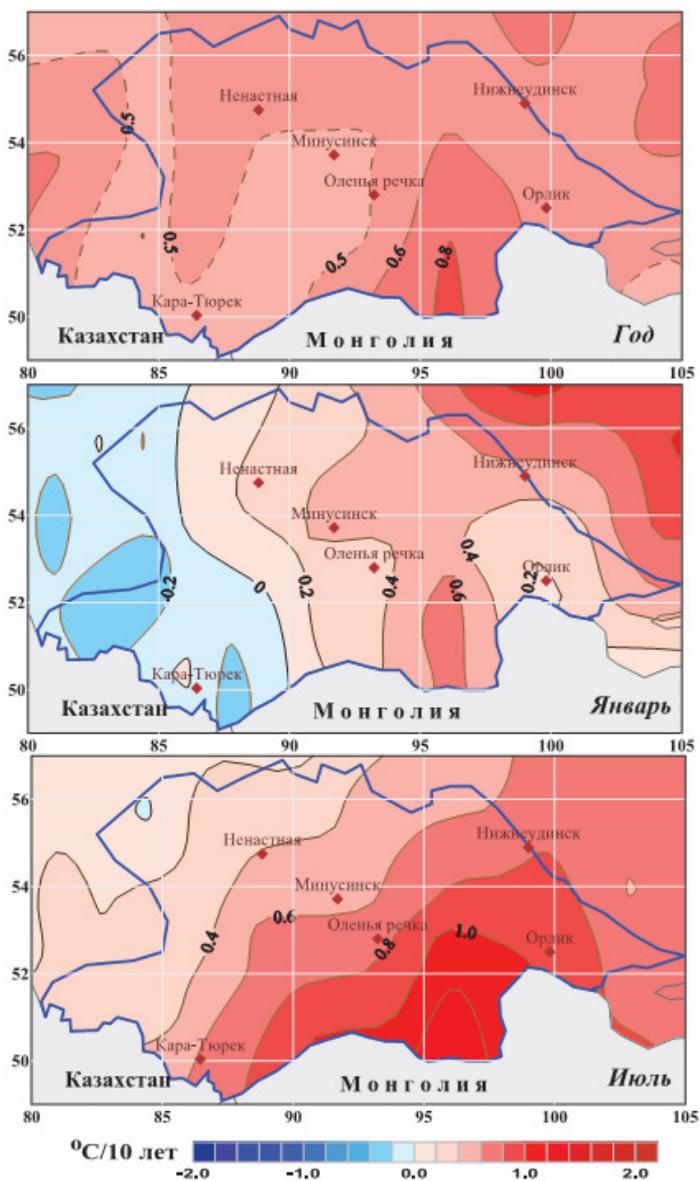


Рисунок 11.8 – Распределение коэффициентов линейного тренда температуры приземного воздуха на территории АСЭ за 1976–2008 гг. (°C/10 лет): в среднем за год, в январе и июле

Локальные тренды среднегодовых температур указывают на тенденцию к очень незначительному потеплению в течение 1976–2008 гг. на всей территории АСЭ. Эта тенденция несколько усиливается в юго-восточном направлении. Фактически такая структура среднегодовых трендов определяется, по-видимому, летними (июльскими) температурами с максимумом потепления около 1,0 °С/10 лет на юге Тувы. Вторая особенность трендов температуры – это наметившаяся тенденция к уменьшению январской температуры в алтайской части АСЭ (на западе экорегиона). Однако в целом оценки трендов температуры представляются столь низкими, что говорить о какой-либо устойчивой тенденции в современных изменениях температурного режима преждевременно.

11.3. Ожидаемые изменения климата

Все сказанное выше (разделы 8, 10) о современных возможностях прогнозирования предстоящих изменений климата на региональном уровне имеет прямое отношение и к региону АСЭ. Качество предлагаемых в IPCC (2007) региональных «проекций» в регионе АСЭ также оказалось достаточно низким, и, как и в случае с островом Вайгач. Поэтому авторам пришлось ограничиться регрессионной оценкой ожидаемых изменений характеристик температурного режима у поверхности в регионе АСЭ на ближайшее 30-летие. Метод – регрессия локальной температуры на атмосферную концентрацию диоксида углерода (был использован в разделе 8 для построения предварительного «прогноза» глобальной температуры и «стратегического прогноза» для территории России и в разделе 10 для ориентировочного прогноза в районе станции «им. Е.К. Федорова»).

Не повторяя деталей, отметим, что данный расчет отличается от расчета для острова Вайгач лишь сроком прогноза (2006–2035 гг.) и, как следствие, периодом оценки регрессии (1976–2005 гг.). На рис. 11.9 для примера приведен прогноз для станции «Нижне-Удинск», а на рис. 11.10 картированы прогностические оценки ожидаемых изменений температурных характеристик до 2035 г. на всех доступных станциях Алтае-Саянского экорегиона. Точнее, оценки относятся к тридцатилетию 2006–2035 гг., т.е. к его центральному году (середине 2021 года).

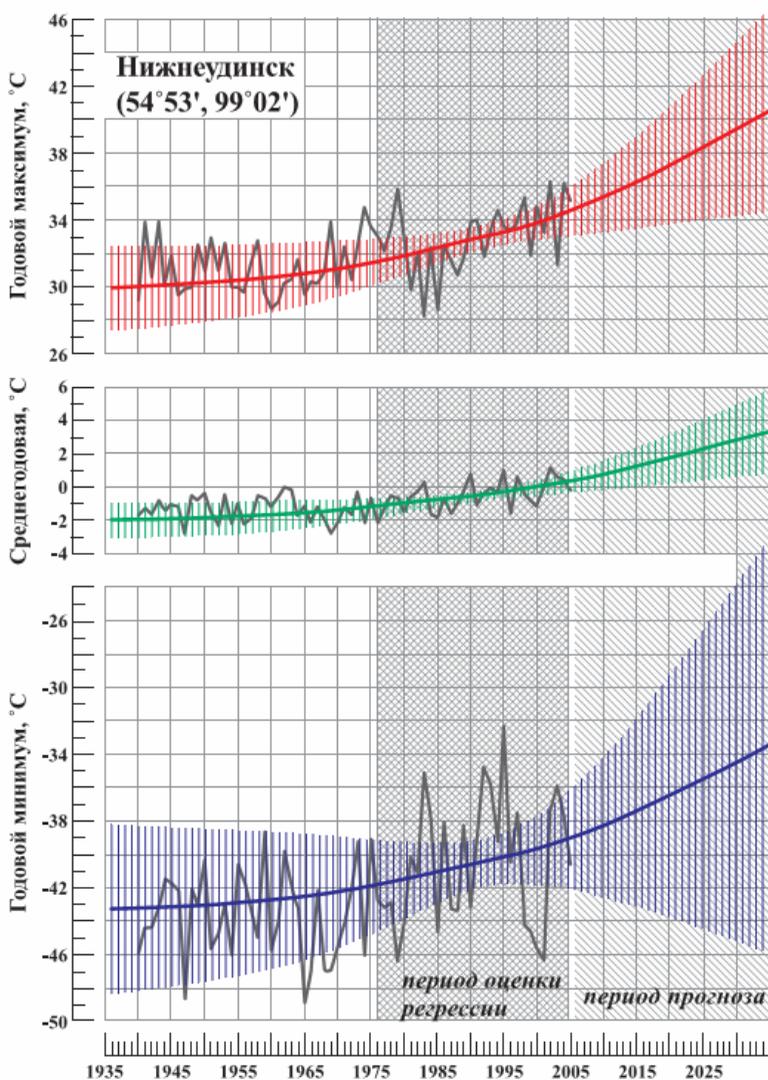


Рисунок 11.9 – Регрессионный прогноз среднегодовой температуры (в центре), годового максимума (вверху) и годового минимума (внизу) с использованием концентрации диоксида углерода в качестве регрессора. Черная ломаная показывает наблюдения; гладкая кривая – линия регрессии; вертикальные отрезки – 95 %-й доверительный интервал предсказанного значения.

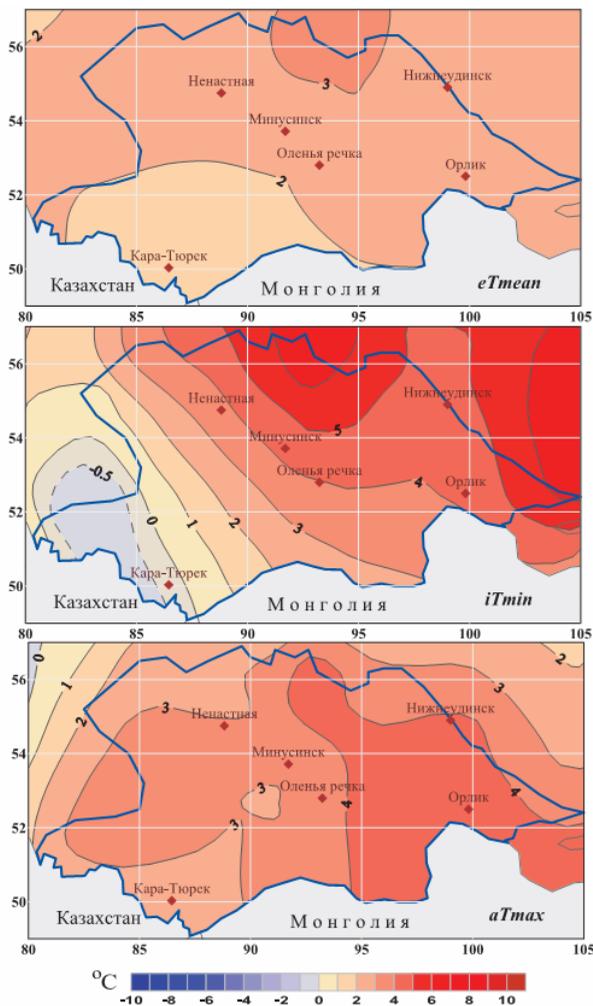


Рисунок 11.10 – Регрессионный прогноз изменения 30-летних норм среднегодовой температуры приземного воздуха (вверху), годовых минимумов (в центре) и годовых максимумов (внизу) на территории АСЭ от 1976–2005 гг. к 2006–2035 гг. при предписанном сценарием SRES A1B изменении концентрации диоксида углерода

Неопределенность стационарных оценок здесь не показана, но может быть картирована аналогичным образом (например, через пространственное распределение p – процентилей).

Прогноз дает детализированную в пространстве информацию об ожидаемых в ближайшие 20–30 лет локальных изменениях температурного режима в регионе АСЭ. В соответствии с этим прогнозом (рис. 11.10) можно ожидать сравнительно однородного на территории АСЭ повышения годовых максимумов на 3–4 °С (в среднем за 20–30 лет). В то же время ожидаемые изменения годовых минимумов не столь однородны. Можно ожидать существенного повышения годовых минимумов в Саянах (до 5–6 °С в Красноярской и Иркутской областях). К юго-западу ожидаемое увеличение минимумов постепенно убывает и на Алтае даже меняет знак (годовые минимумы здесь должны сохраниться на прежнем уровне или даже незначительно снизиться).

Напоминаем, что выбор сценария при таком прогнозе практически не играет роли, т.к. рост концентрации CO_2 в атмосфере в 2006 – 2035 гг. практически совпадает во всех принятых на сегодня сценариях МГЭИК.

В заключение отметим, что при рассмотрении и использовании приводимых в настоящей работе карт климатических величин, полученных с использованием машинной графики по данным весьма ограниченной сети станций, доверия заслуживают только крупные детали.

Отметим также, что цель настоящей публикации – дать возможность читателю (в том числе неклиматологу) ознакомиться с климатом Алтае-Саянского экорегиона, его текущим состоянием, изменчивостью и ожидаемыми изменениями в будущем. Для этого использованы все самые новые данные и все доступные в настоящее время материалы. Конечно, для серьезного научного анализа могут потребоваться дополнительные справочные данные и результаты современных научных исследований. Для этого необходимо обратиться к научной литературе, климатическим справочникам, а также к фондам данных гидрометеорологических наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Напомним, что предлагаемая книга – это лишь подведение итогов многолетней работы авторов, а не обзор и не анализ состояния знаний в обширной, актуальной и бурно развивающейся области знаний о современных изменениях климата.

Предстоящие изменения климата волнуют все человечество, поскольку изменения климата могут привести к нежелательным, опасным и необратимым последствиям во многих регионах Земного шара.

Исследования климата и ожидаемых изменений климата ведутся во многих странах мира, и координация этих исследований осуществляется на уровне ООН и Всемирной метеорологической организации. Межправительственная Группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, англ. – IPCC), в задачи которой входит наиболее полная и объективная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата и роли антропогенных факторов, регулярно публикует доклады, обобщающие результаты исследований климата учеными всего мира. Все доклады МГЭИК доступны в Интернете (<http://ipcc.ch/>).

В 2007 году работа МГЭИК была отмечена Нобелевской премией Мира.

В России многогранные серьезные исследования климата и изменений проводятся в учреждениях Росгидромета (Федеральная служба по климату и мониторингу окружающей среды, <http://www.meteorf.ru>), институтах Российской академии наук (<http://www.inm.ras.ru/>; <http://www.ifaran.ru/>; <http://www.ocean.ru/>), а также во многих университетах.

Результаты регулярного мониторинга климата доступны на сайтах НИУ Росгидромета (<http://www.igce.ru/>; <http://www.meteo.ru/>; <http://meteoinfo.ru/>; <http://www.aari.nw.ru/> и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Багров Н.А. О статистических свойствах некоторых оценок прогнозов // Труды ММЦ. 1966. Вып.9. – С. 61–69.

Будыко М.И. Влияние человека на климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 47 с.

Володин Е.М., Дианский Н.А. Моделирование изменений климата в XX-XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. – Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2006. Том 42, № 3. –С. 1–16.

Всемирная климатическая программа 1992–2001 гг. // Третий долгосрочный план ВМО, ч. II, 1992. Т. II., № 762.

Всемирный фонд дикой природы (WWF), // Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / Под ред. А.О. Кокорина; WWF. – М., 2011. – 168 с.

Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М. Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология. 2008, № 8. –С. 5–19.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я.: Мониторинг и вероятностный прогноз короткопериодных колебаний климата // Шестьдесят лет центру гидрометеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – С.148–170.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я.: Оценка климатического отклика на изменение концентрации тепличных газов по данным наблюдений за приземной температурой воздуха на территории России // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35, № 6. –С. 742–749.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Том 39, № 2. –С. 1–20.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004, № 4. –С. 50–66.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2009, № 11. –С. 15 – 29.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Вероятностная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Российской Федерации: температура воздуха // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIV. – М.: НИЦ «Планета». 2011.–С.43–70.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на европейской территории РФ // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Том 47, № 6. –С. 717–721.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Платова Т.В. Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIII. – М.: ИГКЭ, 2010. –С.11–22.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Климатические изменения температуры воздуха на территории России по данным инструментальных наблюдений // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2007, № 3. –С. 41–48.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Изменения климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6: Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов / Отв. ред. Г.С. Голицын. – М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН. 2008. –С. 11–23.

Дианский Н.А., Володин Е.М. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, №6. –С. 824–840.

Замолодчиков Д.Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата // Вестник РАН. 2013. Т. 83, № 3. – С. 227–235.

Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXII. – СПб.: Гидрометеоздат, 2008. –С. 9–28.

Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. 1974, № 7. –С. 3–8.

Курбаткин Г.П., Груза Г.В., Бирман Б.А., Ранькова Э.Я., Рубинштейн К.Г. Мониторинг климата и климатические условия 1985–1986 гг. // Метеорология и гидрология. 1988, № 4. –С. 5–14.

Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е. Климат России в XXI веке. Ч. 3: Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 // Метеорология и гидрология. 2008б, № 9. –С. 5–19.

Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Климат России в XXI веке. Ч. 1: Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. 2008а, № 6. –С. 5–19.

Мещерская А.В., Мирвис В.М., Голод М.П. Засуха 2010 года на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах европейской части России // Труды ГГО. 2011. Вып. 563. – С. 94–121.

Монин А.С., Берестов А.А. Новое о климате // Вестник Российской академии наук. 2005. Т. 75, № 2. –С. 126–138.

Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата. – М.: Наука. 2005. – 191 с.

Мониторинг и вероятностный прогноз климата. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 128 с.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1: Метеорологические наблюдения на станциях. – Л.: Гидрометеоздат, 1985.

Научно-прикладной справочник «Климат России». – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011.

Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 1999 год. – СПб.: Гидрометеоздат, 1999. – 218 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2008. Т. 1. – 228 с. Т. 2. – 288 с.

Платова Т.В. Климатическая характеристика некоторых показателей экстремальности температуры приземного воздуха и атмосферных осадков на территории России // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2007а, № 1.–С. 38 – 47.

Платова Т.В. Климатические изменения некоторых характеристик температурного режима на территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXI. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2007, –С. 146 – 159.

Ранькова Э.Я., Груза Г.В. Индикаторы изменений климата России // Метеорология и гидрология. 1998, № 1. –С. 5–18.

Ранькова Э.Я., Груза Г.В. Изменения климата в российской части Алтае-Саянского экорегиона // Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / Под ред. А.О. Кокорина. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России). –С. 15–37.

Рубинштейн Е.С. Однородность метеорологических рядов во времени и пространстве в связи с исследованием изменения климата. – Л.: Гидрометеоиздат. 1979. – 80 с.

Рубинштейн Е.С., Полозова Л.Г. Современное изменение климата. – Л.: Гидрометеоиздат. 1966. – 200 с.

Семенов С.М., Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Изменения глобальной температуры и региональные риски при некоторых стабилизационных сценариях антропогенной эмиссии диоксида углерода и метана // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6: Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов / Отв. ред. Г.С. Голицын. – М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН, 2008. –С. 24–36.

Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–20015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 2005. – 28 с.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический справочник. – Л.: Гидрометеоздат. 1974. – 569 с.

Черенкова Е.А., Кононова Н.К. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России // Труды ГГО. 2012. Вып. 565. – С. 165–187.

Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2010, № 11. –С. 5–18.

Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B. and Jones P.D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // *J. Geophys. Res.* 2006. 111. D12106, doi:10.1029/2005JD006548.

Folland C.K., Parker D.E. Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data // *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society.* 1995. 121. –P. 319–367.

GCOS 2002: Guide to the GCOS surface and upper-air networks: GSN and Guan (version 1.1) GCOS –73 (WMO/TD No. 1106) September 2002.

Gruza G., Rankova E., Razuvaev V., Bulygina O. Indicators of Climate Change for the Russian Federation // *Climatic Change.* 1999. 42. –P. 219–242.

Hansen J., Sato Mki., Ruedy R. Perception of climate change // *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2012. 109. – P. 14726–14727, E2415-E2423, doi:10.1073/pnas.1205276109.

Hansen J., Ruedy RSato., M., Lo K. Global surface temperature change // *Rev. Geophys.*, 2010. 48. RG4004, doi: 10.1029/2010RG000345.

Hansen J.E., Ruedy R., Sato Mki., Imhoff M., Lawrence W., Easterling D., Peterson T., Karl T. A closer look at United States and global surface temperature change // *J. Geophys. Res.* 2001. 106. – P. 23947–23963, Doi:10.1029/2001JD000354

IPCC, 1990: Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. The 1990 report of IPCC Working Group I. Edited by J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia. – 410 pp.

IPCC, 1995: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.T.Houghton, L. G. Meira Filho and B.A.Callandar (eds.). Cambridge University Press. – 572 pp.

IPCC, 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden and D.Xiaosu (eds.). Cambridge University Press. – 944 pp.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Solomon, S., D.Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jones P.D. Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993 // *J. of Climate*. 1994. 7. – P. 1794–1802.

Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M. and Morice C.P. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophys. Res.* 2012. Doi:10.1029/2011JD017139.

Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S. and Rigor I.G. Surface air temperature and its variations over the last 150 years // *Reviews of Geophysics*. 1999. V. 37. – P. 173–199.

Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. – P. 437–484.

Livezey R., Vinnikov K., Timofeyeva M., Tinker R., and Van Den Dool H. Estimation and Extrapolation of Climate Normals and Climatic Trends // *J. Appl. Meteor. Clim.* 2007 V.46. – P. 1759–1776. Doi: 10.1175/2007JAMC1666.1

Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // *J. Atmos. Sci.* 1963. V. 20. – P. 130–141.

Lorenz E.N. Predictability – A problem partly solved. Proc. Seminar on Predictability, Shinfield Park, Reading, ECMWWF, UK, 1996. – P. 1–18.

Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A. and Jones P.D. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset // *J. of Geophys. Res.* 2012. V. 117. D08101, doi:10.1029/2011JD017187.

Peterson T., Daan H. and Jones P. Initial selection of a GCOS surface network; GCOS-34, February 1997, WMO/TD N. 799.

Randall Dole, Hoerling M., Periwitz J., Eischeid J., Pegion Ph., Zhang T., Quan X.W., Xu T. and Murray D. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. P. L06702.

Smith T. M., and Reynolds R. W. A global merged land air and sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880–1997) // *J. Climate.* 2005. V. 18. – P. 2021–2036.

SRES: Emission Scenarios. Summary for Policymakers. IPCC Special Report of Working Group III. – WMO/UNEP. SRES. 2000. – 20 p.

Tett S.F.B., Johns T.C. and Mitchell J.F.B. Global and regional variability in a coupled AOGCM // *Climate Dynamics.* 1997. V. 13. – P. 303–323.

Thorne Peter W., and Coauthors Guiding the Creation of A Comprehensive Surface Temperature Resource for Twenty-First-Century Climate Science // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2011. V. 92. ES40–ES47. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011BAMS3124.1>

Trenberth K. E., Fasullo J. T. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010 // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D17103, doi:10.1029/2012JD018020.

WMO: Climatic normals (CLINO) for CLIMATE and CLIMATE SHIP Stations for the period 1931–1960. – WMO/OMM, 1962. No. 117. – P. 52.

WMO: Calculation of monthly and annual 30-year standard normals, WCDP-No. 10 (WMO-TD/No. 341), Geneva, 1989. – 11 pp.

WMO: Standardised Verification System for Long-Range Forecasts. In: *Manual on the GDPFS* (WMO-No. 485). 2006. V. I.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я.
Наблюдаемые и ожидаемые изменения
климата России: температура воздуха

Подписано к печати 17.12.2012. Формат 60×84/16.
Печать цифровая. Печ. л. 11,3. Тираж 216 экз. Заказ № 37.

Отпечатано в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», г. Обнинск, ул. Королева, 6.

