ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том XXIV

МОСКВА — 2011

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XX ВЕКЕ – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

О. А. Анисимов[1]*, Е. Л. Жильцова, В. А. Кокорев*

Россия, 199053 С.-Петербург, 2-я линия В. О., д. 23, Государственный гидрологический институт. [1]oleg@oa7661.spb.edu

Реферат. Анализ рядов приземной температуры воздуха на 744 метеостанциях России и сопредельных стран показал, что потепление климата в начале и в конце XX века обладало выраженными региональными особенностями. Начало процесса потепления не было одновременным на всей рассматриваемой территории. В данной работе исследована пространственная связанность поля температуры и выделены 15 регионов на территории России с синхронными изменениями на протяжении последних 35 лет. Для них были рассчитаны среднерегиональные тренды сезонных и среднегодового значений температуры воздуха в 1976—2009 гг. На основе количественных статистических критериев были также рассчитаны начальные годы современного изменения климата для каждой из метеостанций и построено их распределение по территории России. Полученные результаты дают возможность уточнить оценки уровня и пространственно-временной структуры современного потепления на территории России.

Ключевые слова. Изменение климата, районирование, температура воздуха, тренд.

SPATIAL AND TEMPORAL PATTERNS OF AIR TEMPERATURE CHANGES IN RUSSIA IN THE 20th CENTURY AND EARLY 21st CENTURY

O. A. Anisimov[1]*, E. L. Zhiltsova, and V. A. Kokorev*

State Hydrological Institute, 23, Vtoraya liniya, V. O., 199053 St. Petersburg, Russia. [1]oleg@oa7661.spb.edu

Abstract. Analysis of series of the surface air temperature from 744 weather stations in Russia and neighboring countries showed that climate warming in the early and late 20th century had distinct regional patterns. The start of the warming process was not simultaneous at various parts of the territory. We studied spatial correlations of the surface air temperature, identified 15 regions with coherent changes over the past 35 years within the territory of Russia, and calculated the average regional trends of the seasonal and mean annual temperatures in 1976–2009.

Statistical criteria for identification of the beginning of the recent climate change were applied to the data from meteorological stations, and then the spatial distribution over Russia was plotted. The results obtained give an opportunity to improve the estimates of the level and spatiotemporal distribution of the recent warming over the Russian territory.

Key words. Climate change, regionalization, air temperature, trend.

Введение

В последние 100 с небольшим лет имели место два периода с продолжительным повышением глобальной температуры воздуха, начало которых пришлось на конец первой и начало последней четверти XX столетия. Если причины первого из этих потеплений, наиболее выраженного в высоких широтах Северного полушария, до конца не выяснены и его часто объясняют естественной изменчивостью климата, то, согласно расчетам по гидродинамическим моделям, во второе потепление значительный вклад внесло антропогенное увеличение содержания парниковых газов в атмосфере, без которого объяснить его было бы невозможно (Solomon et al., 2007). Это дает основания полагать, что пространственно-временная структура полей температуры и осадков, фиксируемая современными наблюдениями, отражает закономерности антропогенного потепления и может служить основой эмпирико-статистического прогноза на период в одно-два десятилетия. Принципы построения такого прогноза были изложены в ряде предшествующих публикаций (Анисимов, Белолуцкая, 2003; Анисимов и др., 2007) и здесь обсуждаться не будут. Отметим лишь, что его важнейшей предпосылкой являются анализ региональных изменений метеовеличин и установление их связи с модельным предиктором, в качестве которого обычно используется температура воздуха, осредненная по Северному полушарию.

Показательно, что при наличии в рассматриваемый период глобально действующего фактора в виде увеличения содержания долгоживущих и хорошо перемешиваемых парниковых газов в атмосфере наблюдается значительная пространственная неоднородность изменений температуры воздуха. Так, на большей части России ее увеличение как в среднем за год, так и отдельно по сезонам заметно превышает среднеглобальную величину, при этом имеют место значительные региональные различия (Оценочный доклад..., 2008). Регионы различаются и по времени начала как первого, так и второго потепления.

Многие авторы отмечают, что значительная естественная межгодовая изменчивость метеовеличин в сочетании с пространственной и временной неоднородностью их трендов осложняют задачу анализа современных региональных изменений климата на территории России. Так, в работе Г. В. Груза (Груза и др., 2008) был проведен анализ зависимости статистических параметров временных рядов температуры воздуха и осадков от продолжительности и начала обрабатываемого периода. Он показал, что результирующие оценки средних значений, стандартного отклонения и коэффициентов линейного тренда даже в целом по всей России могут заметно изменяться в зависимости от выбора указанных параметров, а для осадков смещение периода на 1—2 года может привести даже к изменению знака тренда. В таких условиях закономерен вопрос о фрагментации полей метеовеличин в пространстве и во времени, соответствующей их структуре. Основу этой проблемы составляет районирование современных изменений климата. Проведенный нами анализ показал, что из-за крайне сложной структуры поля осадков для них невозможно выделить однородные регионы, сохраняющие неизменность своих границ для всех сезонов и форм циркуляции. Помимо этого, рассматриваемые в статье методы фрагментации предполагают непрерывность поля метеовеличины, в то время как поле осадков этим свойством не обладает. По этой причине в статье мы ограничились анализом пространственной и временной динамики приземной температуры воздуха.

В работе использовались ряды температуры воздуха месячной дискретности на 744 метеостанциях, из которых 625 расположены в России (включая островные станции), а оставшиеся — на территории сопредельных государств бывшего СССР. Эти ряды были получены объединением двух климатических архивов, разработанных и продлеваемых в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (455 станций на территории бывшего СССР, в том числе 310 на территории России) и во ВНИИГМИ-МЦД (518 станций на территории России, из которых 229 совпадают с архивом ИГКЭ, а оставшаяся часть дополняет его) (Архив..., 2011). Для фрагментации во времени критическую роль играет непрерывность ряда наблюдений. Поскольку исходные ряды на многих метеостанциях имеют пропуски, в этой части работы нами также использовался архив CRU TS 2.1, разработанный и продлеваемый в Университете Восточной Англии, Великобритания (Mitchell, Jones, 2005). Он был получен интерполяцией аномалий метеорологических характеристик (по отношению к периоду 1961—1990 гг.) на метеостанциях в узлы широтно-долготной сетки $0{,}5 \times 0{,}5^{\circ}$ с использованием метода сплайнов (описание метода дано в (New et al., 1999)) с последующим восстановлением абсолютных значений с помощью архива норм за 1961—1990 гг. (архив CRU CL 1.0). Значения температуры приведены к высотам узлов сетки, которые заданы топографической моделью, сама модель также входит в сопутствующую документацию. Как было показано в нашей предшествующей работе (Жильцова, Анисимов, 2009), при том, что имеют место значительные расхождения между данными разных сеточных архивов и фактическими наблюдениями на метеостанциях, архив CRU воспроизводит температурное поле на территории России с наименьшей погрешностью.

Пространственная фрагментация для анализа современных изменений приземной температуры воздуха

Пространственная фрагментация полей метеовеличин, или районирование климата, играет ключевую роль в анализе и прогнозе его состояния, проводимых на основе как данных наблюдений, так и физически полных гидродинамических моделей. Классическое районирование, основанное на широтной зональности, континентальности и орографии, не вполне адекватно многим современным задачам, связанным с глобальными и региональными изменениями климата. Выделенные для некоторых средних климатических условий районы не являются стабильными во времени как из-за естественных колебаний, смены эпох атмосферной циркуляции, так и из-за долгопериодных изменений климата. В результате происходят изменения региональных климатических параметров, соотношений между ними в разных регионах, а также изменения границ и размеров районов.

Дилемма при выборе пространственной фрагментации заключается в том, что, с одной стороны, выделяемые в ней регионы должны быть обеспечены данными метеонаблюдений и репрезентативны в отношении определенного типа ландшафтных, биотических, административных или каких-либо иных условий, а значит не слишком малы, а с другой — достаточно однородны в отношении современных изменений изучаемой характеристики. Решение не является единственным, поскольку, следуя разным алгоритмам, можно придти к множественным вариантам районирования. Принципиальным является лишь удовлетворение сформулированным условиям, поскольку в противном случае трудно выявить причинно-следственные связи между региональными изменениями и динамикой глобального климата. Об адекватности фрагментации, в результате которой все рассматриваемое пространство разделяется на однородные районы, свидетельствуют следующие основные показатели:

— высокая связанность многолетних рядов внутри района, выраженная средним по району коэффициентом парной корреляции;

— малая внутрирайонная неоднородность, выраженная малой остаточной дисперсией от среднего районного коэффициента корреляции и отсутствием зависимости остатков от географических координат;

— существенное различие между обобщенными климатическими показателями соседних однородных районов, проявляющееся, например, в сопоставлении внутрирайонных и межрайонных средних значений и дисперсий и характеризуемое резким уменьшением коэффициентов парной корреляции и пространственной корреляционной функции на границе между районами.

С теоретических позиций наиболее оправданным является районирование на основе анализа пространственной корреляционной функции, при котором границы между регионами проводятся там, где она достигает локальных минимумов. Попытка построить такую функцию для территории бывшего СССР была впервые предпринята еще в 1960-х годах, однако не принесла желаемого результата (Гандин, 1963). При выраженной анизотропии температурного поля для построения этой функции с приемлемой точностью требуется более густая сеть наблюдений. Реализованный нами альтернативный подход заключается в том, чтобы, задавшись некоторым существующим пространственным районированием, исследовать его репрезентативность в отношении современных климатических изменений, проведя при необходимости дополнительное разбиение изначально неоднородных региональных единиц на более мелкие. В ряде предшествующих работ были использованы разные варианты пространственного районирования с выделением на территории России 6, 15 и 22 климатических регионов (Анисимов и др., 2007; Груза, Ранькова, 2009; Груза и др., 2006, 2007, 2008; Оценочный доклад..., 2008; Стратегический прогноз... ,2005). Разделение на 6 крупных регионов по географическому признаку было предложено ИГКЭ и используется Росгидрометом в ежегодных докладах об особенностях климата, а также в Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. В Стратегическом прогнозе изменений климата на период до 2010—2015 гг. были использованы 15 регионов, основанные на административном делении территории России (Стратегический прогноз... , 2005). Отметим, что этот вариант районирования является актуальным также и потому, что он максимально отвечает современным требованиям, предъявляемым к Росгидромету в части научного обеспечения стратегий адаптации федеральных округов РФ к предстоящим изменениям климата. И, наконец, 22 региона представляют собой вариант административно-географического

Таблица 1

Соотношение между 15 регионами климатического районирования и федеральными округами

Регион	Федеральный округ
1, 2	Северо-Западный
3, 4	Центральный
5	Южный и Северо-Кавказский
6	Приволжский
7, 8	Уральский
9—11	Сибирский
12—15	Дальневосточный

районирования, полученный дополнительным делением четырех из 15 регионов предыдущего разбиения (Анисимов и др., 2007).

Проведенное в (Анисимов, Жильцова, 2012) сопоставление показало, что оптимальную репрезентативность обеспечивает деление на 15 регионов, в основе которого лежат границы федеральных округов РФ с дополнительным делением пяти из них на более мелкие части, однородные в плане современных изменений температуры воздуха (см. табл. 1 и рис. 1). Разделение на 6 регионов менее репрезентативно, а более детальная фрагментация с выделением 22 регионов не улучшает существенным образом однородности по выбранным критериям.

Выбранная схема районирования и расположение метеостанций с указанием площади их влияния показаны на рис. 1. За площадь влияния принимается область, объединяющая все точки, для которых данная станция является ближайшей. Разделение территории на области влияния широко используется во многих геоинформационных системах, соответствующий алгоритм известен как расчет полигонов Вороного — Тиссена. При региональном осреднении учитывались все станции, в том числе и вне территории России, области влияния которых полностью или частично попадают в рассматриваемый регион. Данные осреднялись с весами, равными площадям соответствующих полигонов или их частей в рассматриваемом регионе, при этом полигональное разбиение пересчитывалось для каждого месяца и года рассматриваемого периода с учетом имеющих место пропусков наблюдений.

Для оценки пространственной однородности каждого из регионов в отношении современных изменений температуры воздуха были рассчитаны средние значения r и среднеквадратические отклонения σ_r коэффициентов корреляции между осредненным по региону временным рядом температуры и рядами на

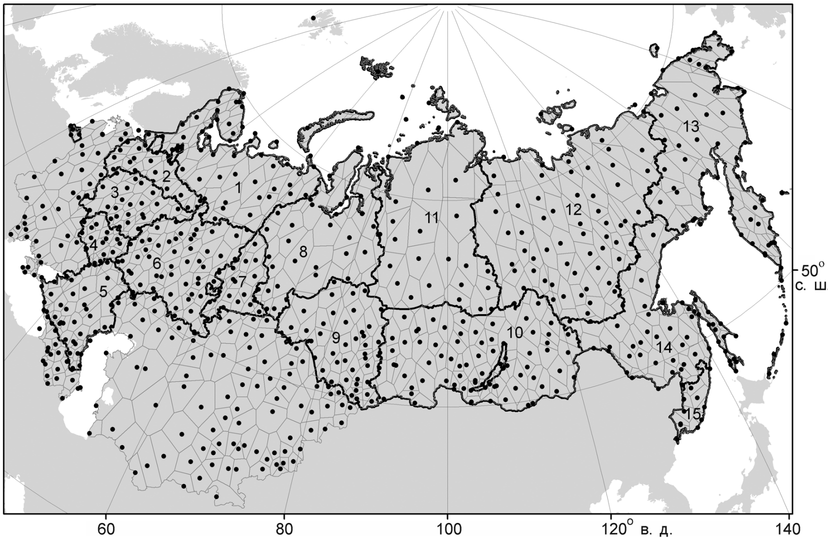

Рис. 1. Районирование территории России с выделением 15 регионов и используемая сеть наблюдений с указанием области влияния каждой метеостанции.

каждой из станций данного региона. Эти величины, рассчитанные для периода 1976–2009 гг., приведены в табл. 2.

Большие значения коэффициентов корреляции во всех регионах и во все сезоны года, равно как и небольшие значения среднеквадратических отклонений свидетельствуют о том, что использованная в работе схема районирования репрезентативна в отношении пространственного распределения современных изменений приземной температуры воздуха. Для выделенных регионов были рассчитаны тренды сезонных и среднегодовой температуры за период 1976—2009 гг., результаты приведены в табл. 3. Тренды повсеместно достаточно велики во все сезоны года, при том, что велика и контрастность по регионам. Так, диапазон трендов зимней температуры составил от −2,7°С/100 лет на Дальнем Востоке (регион 13) до 11,1°С/100 лет на северо-западе (регион 2). В среднем по всей России в последние 35 лет значительное потепление наблюдается весной и осенью. Наибольшее повышение демонстрирует температура на европейской части страны зимой. Летом потепление наименее выражено, региональные тренды, как правило, заметно меньше, чем в остальные сезоны года. Результаты анализа не подтверждают распространенной точки зрения о том, что интенсивность потепления увеличивается к северу. При достаточно пестрой

Таблица 2

Средние по регионам значения коэффициента парной корреляции временных рядов аномалий температуры на каждой из станций региона со средним по региону временным рядом за периоды 1976—2009 гг. *r* и их среднеквадратические отклонения σ_r

Регион	Зима		Весна		Лето		Осень		Год	
	r	σ_r	r	σ_r	r	σ_r	r	σ_r	r	σ_r
1	0,93	0,03	0,88	0,06	0,76	0,13	0,90	0,05	0,91	0,04
2	0,97	0,02	0,94	0,04	0,91	0,09	0,96	0,03	0,97	0,02
3	0,98	0,01	0,97	0,03	0,95	0,04	0,97	0,02	0,99	0,01
4	0,99	0,01	0,98	0,01	0,97	0,02	0,98	0,02	0,99	0,01
5	0,85	0,15	0,88	0,07	0,91	0,06	0,92	0,09	0,91	0,08
6	0,94	0,04	0,92	0,05	0,90	0,06	0,96	0,03	0,95	0,04
7	0,95	0,04	0,94	0,04	0,96	0,04	0,96	0,05	0,95	0,05
8	0,93	0,05	0,90	0,05	0,87	0,07	0,90	0,08	0,90	0,07
9	0,90	0,15	0,93	0,06	0,81	0,11	0,92	0,09	0,91	0,11
10	0,86	0,12	0,92	0,05	0,85	0,09	0,88	0,08	0,90	0,07
11	0,87	0,16	0,88	0,08	0,81	0,12	0,88	0,13	0,85	0,14
12	0,77	0,20	0,87	0,06	0,79	0,12	0,84	0,10	0,88	0,06
13	0,67	0,12	0,85	0,08	0,63	0,17	0,82	0,08	0,79	0,09
14	0,83	0,15	0,85	0,10	0,70	0,14	0,85	0,12	0,86	0,11
15	0,92	0,06	0,93	0,04	0,88	0,04	0,95	0,03	0,94	0,03

картине потепления его максимум в среднем за год приходится на центр западной территории европейского севера России.

Оценка временных границ периодов с разным климатическим режимом для регионов России в XX веке

В предшествующем разделе проведен анализ региональных трендов температуры воздуха, рассчитанных за фиксированный период 1976—2009 гг. Начальный год был выбран достаточно произвольно, он соответствует распространенным представлениям о начале современного изменения климата, вытекающим из многочисленных публикаций, в том числе и основополагающего Оценочного доклада Росгидромета об изменении климата на территории России (Оценочный доклад..., 2008). Вместе с тем, как отмечалось в (Груза и др., 2008), выбор точки начала отсчета и продолжительности периода оказывает существенное влияние на величину тренда, а для осадков в некоторых регионах может изменить и его знак. Обоснованная дискретизация во времени играет не меньшую роль в понимании современной динамики климата, чем рассмотренная выше дискретизация в пространстве. Под дискретизацией во времени понимается определение границ

Таблица 3

Региональные тренды температуры воздуха (°C/100 лет), рассчитанные по данным за период 1976—2009 гг.

Регион	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1	9,0	2,7	4,1	5,1	5,2
2	11,1	3,6	5,1	5,0	6,2
3	9,9	4,0	4,9	5,6	6,2
4	9,1	5,1	6,4	6,8	6,9
5	5,4	3,6	5,8	6,3	5,3
6	7,3	4,4	3,6	7,2	5,7
7	5,7	3,9	1,9	7,0	4,5
8	3,9	5,2	2,1	2,9	3,3
9	3,4	7,6	0,6	3,8	3,6
10	4,8	7,0	5,1	2,3	4,6
11	3,0	7,1	2,2	2,9	3,9
12	2,5	5,8	5,3	6,8	5,3
13	−2,7	8,6	4,8	8,0	4,9
14	3,9	4,5	2,7	5,5	4,2
15	6,1	3,3	2,2	4,5	3,8
РФ	4,0	5,8	3,8	5,1	4,7

климатических периодов или эпох, характеризуемых общностью статистических характеристик какого-либо параметра климата и принадлежностью их к одной и той же генеральной совокупности.

При статистическом анализе характеристик климата можно использовать три основных вида модели временного ряда: стационарный ряд с присущей ему естественной изменчивостью; изменения, содержащие линейный тренд; ступенчатые переходы от одного стационарного состояния к другому.

Каждая из этих моделей отражает различные физические механизмы климатической системы. Изменения в виде линейного тренда имеют место в слабоинерционной равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений характеризует неравновесную систему, которая может компенсировать внешние воздействия до тех пор, пока они не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, часто квазистационарный, уровень. Стационарный временной ряд может быть особым состоянием как равновесной, так и неравновесной системы. В первом случае это проявление случайных внешних воздействий, во втором — период стабильного состояния, в который величина внешнего воздействия не превысила критического порога.

В предшествующей работе (Анисимов и др., 2007) было проведено сравнение трех видов моделей временного ряда приземной температуры воздуха для регионов России. Критерием, по которому оценивался выбор модели, служил стандарт отклонений временного ряда от принятой модельной аппроксимации. Было установлено, что стационарная модель хуже двух других описывает изменчивость временного ряда температуры. В среднем по всей территории России при использовании модели стационарного временного ряда стандарт отклонений оказался на 11,2% больше, чем при использовании модели тренда, и на 10,3% больше, чем в модели ступенчатых изменений. При использовании этих моделей стандарт отклонений уменьшается в ряде регионов более чем на 20% по сравнению с моделью стационарного ряда. Выводы этой работы позволяют принять в качестве основной модель временного ряда температуры воздуха в виде линейного тренда. Остаются открытыми вопросы о том, где провести временные границы отдельных климатических периодов, в частности современного потепления, и можно ли определить их объективными методами. Еще один вопрос — совпадают ли эти временные границы в разных регионах мира и России, или же они различаются, складываясь под влиянием локальных факторов?

Один из методов визуального определения временных границ климатических периодов состоит в расчете трендов температуры за разные интервалы времени и построении диаграмм, по осям которых отложены начальный год и продолжительность периода, за который был рассчитан тренд. На рис. 2 приведена такая диаграмма для осредненной по Северному полушарию среднегодовой температуры воздуха. Были использованы данные сеточного архива CRU TS-2.1 за период 1860—2000 гг. Показанные на диаграмме тренды рассчитаны с шагом начальной точки отсчета в год за периоды времени разной продолжительности, составляющей не менее 20 лет. Заметим, что в работе (Груза и др., 2008) аналогичные диаграммы были построены для глобальной и осредненной по территории России среднегодовой температуры воздуха. Присутствующие на диаграмме диагональные полосы одинаковой окраски соответствуют временным границам разных климатических периодов. Так, на рис. 2 наиболее выражена белая полоса, соответствующая смене климатического режима Северного полушария на рубеже 1970-х и 1980-х годов, когда начался период современного потепления, продолжающийся по настоящее время.

Недостатком этого метода является отсутствие количественных критериев, которые позволили бы однозначно и объективно определять временные границы разных периодов. Поэтому в

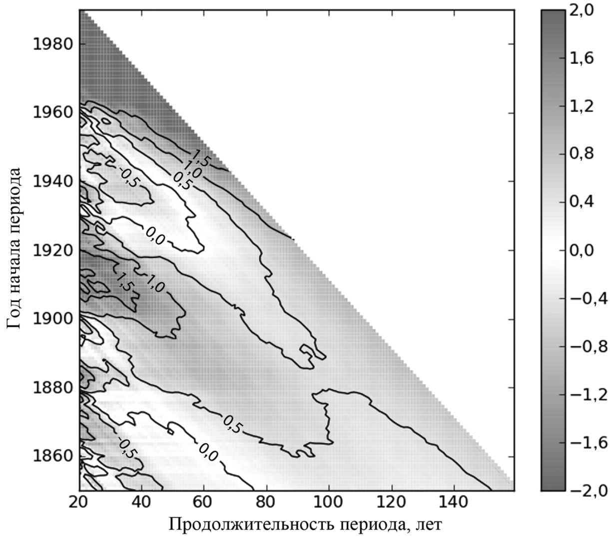

Рис. 2. Тренды осредненной по Северному полушарию среднегодовой температуры воздуха (°C/100 лет) в зависимости от длины периода и его начального года.

данной работе был использован иной метод разностно-интегральных кривых, основанный на анализе кумулятивной суммы отклонений ежегодных значений переменной от среднего:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x}),$$

где x_i — значение температуры (сезонной или среднегодовой) в конкретный год, $\bar{x}$ — среднее значение температуры за весь период, N — длина ряда.

Отыскиваются экстремумы функции $f(t)$, после чего определяется, являются ли соответствующие годы границами климатических периодов. Это можно сделать двумя способами. По первому способу вычисляются тренды до и после точки экстремума, и если различие между ними превышает заданный предел, то гипотеза принимается. По второму способу по какому-либо из статистических критериев проверяется однородность рядов температуры до и после точки экстремума, при этом гипотеза отклоняется или принимается в зависимости от заданного уровня значимости. Реализация второго способа осложнена тем, что каждый статистический критерий имеет свои ограничения по отношению к свойствам ряда, при том, что на практике часто встречаются короткие ряды продолжительностью 20—30 лет. Поэтому в данной работе предпочтение было отдано первому способу.

Для применения изложенного метода требуется задать ряд параметров и в первую очередь минимальную длину ряда для расчета тренда. Общепринято полагать ее равной 30. Вместе с тем при таком значении этого параметра многие станции архива должны быть исключены из-за пропусков наблюдений и недостаточной продолжительности рядов. Расчеты по данным 744 метеостанций показали, что при уменьшении значения параметра с 30 до 20 число станций, на которых выявляются граничные точки, увеличивается более чем в два раза (433 против 177) главным образом оттого, что на многих станциях эти точки приходятся на конец 1970-х — начало 1980-х годов, а ряд последующих наблюдений не насчитывает требуемых 30 лет. С учетом этого в расчетах всех трендов минимальная продолжительность ряда была задана равной 20 годам.

Следующим параметром является величина, на которую должен измениться тренд, чтобы это изменение можно было принять за начало нового климатического периода. Расчеты показали, что с увеличением этого параметра растет соотношение между числом станций с положительными и отрицательными изменениями тренда. Для значения параметра 30% данное соотношение приближается к 4, при увеличении значения параметра до 80% соотношение увеличивается до 5,5. Это свидетельствует о том, что при разнонаправленности изменений на разных станциях увеличение тренда в среднем по абсолютной величине больше, чем уменьшение тренда. В расчетах этому параметру было присвоено значение 30%.

Было наложено еще одно ограничение, согласно которому точка отбрасывалась как незначимая, если абсолютная величина максимального из двух трендов до и после нее не превышала 0,8°C/100 лет.

С использованием изложенного выше метода были проанализированы ряды температуры воздуха на всех метеостанциях и для каждой определены временные границы, разделяющие разные климатические периоды. Полученное распределение граничных точек в пространстве показано на рис. 3, а распределение числа точек по годам — на рис. 4.

Выделенные на рис. 3 области были получены объединением ареалов метеостанций, на которых временные границы климатических периодов попадают в одну и ту же категорию (с 5-летним шагом по времени, см. легенду рис. 3). Сами ареалы были рассчитаны с использованием алгоритма кластеризации Вороного — Тиссена при помощи ГИС Idrisi-32.

На рис. 3 видно, что период современного потепления на севере Центральной и Восточной Сибири начался уже в 1960-х годах. К началу 1970-х годов он начался во всей Западной Сибири и на Дальнем Востоке, и лишь к 1980-м годам потепление стало отчетливо выявляться в других регионах страны.

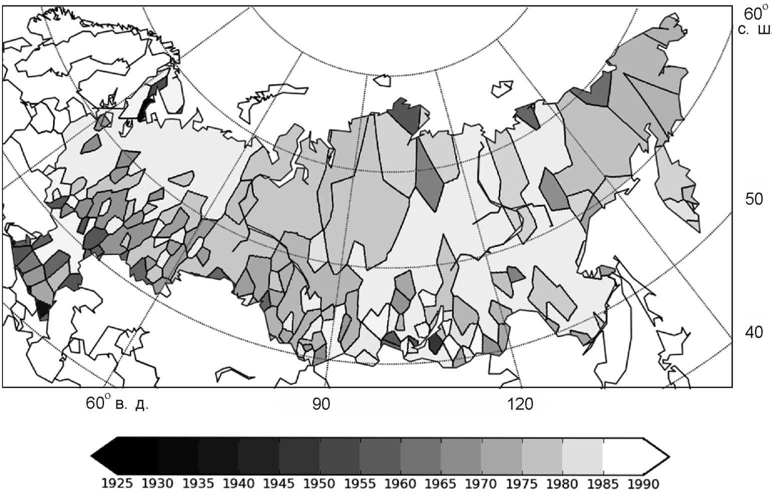

Рис. 3. Пространственное распределение временных границ климатических периодов, рассчитанных по данным метеостанций для среднегодовой температуры.

Диаграммы на рис. 4 показывают, что как для сезонных значений, так и для среднегодовой температуры распределение числа граничных точек по времени имеет несколько максимумов вблизи 1960, 1972, 1975 и 1979 гг., что в общих чертах повторяет закономерности, выявленные на диаграмме трендов температуры для Северного полушария (рис. 1). Можно отметить также и то, что даже в последней трети XX века на небольшой части станций тренд после граничной точки изменился в сторону уменьшения, что особенно хорошо видно по данным о зимней температуре.

Результаты расчетов прошли проверку с использованием критерия согласия Колмогорова — Смирнова. Данный критерий позволяет проверить гипотезу о том, что две эмпирические выборки подчиняются одному закону распределения. За нулевую гипотезу принималось утверждение, что две части ряда температуры, разделенные граничной точкой, обусловлены разными климатическими режимами и подчиняются разным законам распределения. Результаты проверки показали, что на 10%-ном уровне значимости эта гипотеза принимается для всех выявленных граничных точек, лежащих во временном интервале 1970—1989 гг., а из граничных точек, попадающих в более ранний период, значима только половина. При уровне значимости 5% большая часть граничных точек, расположенных после 1970 г., остается значимой. Эти результаты подтверждают работоспособность метода разностно-интегральных кривых в нахождении точек изменения климатического режима.

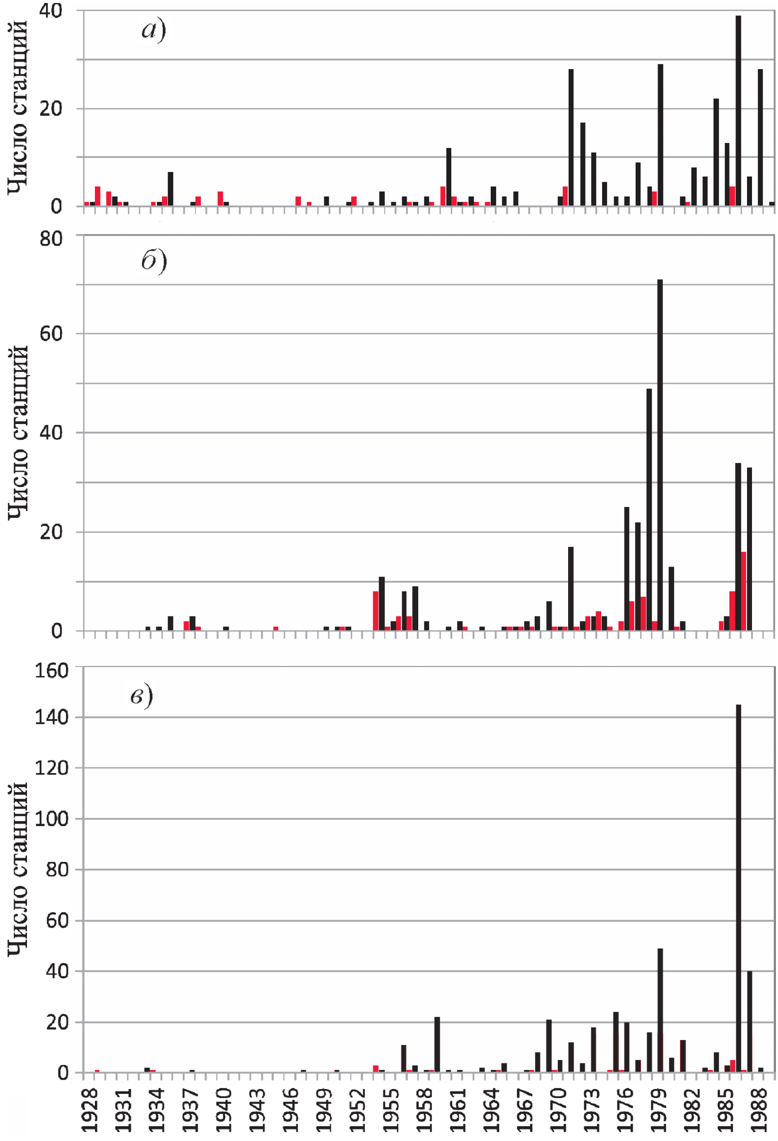

Рис. 4. Распределение по годам временных границ климатических периодов, рассчитанных по данным метеостанций для летней (*а*), зимней (*б*) и среднегодовой (*в*) температуры. Красным цветом обозначено число станций с отрицательными изменениями, темным — с положительными.

Дискуссия

Усилиями международного научного консорциума удалось выработать согласованные высокотехнологичные методы построения климатических проекций, в том числе при помощи гидродинамических моделей с высоким пространственным разрешением, в которых вся территория России представлена с той же глубиной научной проработки и детализацией, что и другие регионы Европы и Америки. Это создает предпосылки и повышает актуальность решения задачи по оценке последствий изменений климата для природных и экономических систем. По этому направлению Россия заметно отстает от многих других стран, главным образом из-за несопоставимых объемов проводимых полевых исследований, при том, что в стране имеется немало модельных разработок, которые соответствуют мировому уровню.

В контексте моделирования последствий для экосистем важно, что они определяются как величиной, так и скоростью изменения влияющих факторов. Понятие критического уровня климатического воздействия, широко применяемое в современной научной литературе, должно включать в себя обе названные составляющие. Экосистемы обладают способностью адаптироваться ко многим изменениям при условии, что присущая конкретной системе и часто физиологически лимитированная скорость адаптации выше, чем скорость изменения влияющего фактора. При общем понимании этого тезиса в современной научной литературе весьма малочисленны данные о соотношении скорости двух названных процессов. Одной из главных мотиваций данной статьи была потребность установить возможно более точно максимальные темпы изменения климата, проявляемые через изменения приземной температуры воздуха на региональном уровне, дополнив этими сведениями знания о величине современного потепления. Эта информация, по мнению авторов, может стимулировать дальнейшие работы по изучению и моделированию адаптации экосистем.

Предложенный в статье подход основан на выделении временных границ периодов с разным климатическим режимом. Очевидно, если вместо фиксированных достаточно больших интервалов времени в расчетах использовать выделенную нижнюю границу современного периода потепления, оценки величины региональных трендов могут лишь увеличиться или же в редких случаях остаться на прежнем уровне. По нашему убеждению, именно эти экстремальные значения темпов современного потепления и следует положить в основу работ по моделированию воздействия климата на экосистемы, соотнося их с физиологически обусловленными пределами скорости их адаптации.

За рамками статьи остался вопрос об обусловленности различий во времени границ идентичных климатических периодов в разных регионах. Очевидно, что в нем важную роль играет соотношение между глобальными факторами, действующими на термический режим, и региональными особенностями атмосферной циркуляции. Этот вопрос еще предстоит изучить в ходе дальнейших исследований.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 11-05-12011-офи-м-2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О. А., Белолуцкая М. А. 2003. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XIX. СПб: Гидрометеоиздат. С. 21—38.

Анисимов О. А., Жильцова Е. Л. 2012. Об оценках изменений климата XX века и начала XXI столетия по данным наблюдений на территории России. Метеорология и гидрология (в печати).

Анисимов О. А., Лобанов В. А., Ренева С. А. 2007. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть XXI века. Метеорология и гидрология. № 10. С. 20—30.

Архив температуры воздуха и осадков месячного разрешения для территории России. http://meteo.ru/climate/sp_clim.php. 2011. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД.

Гандин Л. С. 1963. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат. 288 С.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2009. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации. Метеорология и гидрология. № 11. С. 5—29.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Аристова Л. Н., Клещенко Л. К. 2006. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России. Метеорология и гидрология. № 10. С. 5—23.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. 2007. Климатические изменения температуры воздуха на территории России по данным инструментальных наблюдений. Бюллетень “Использование и охрана природных ресурсов в России”. № 3.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. 2008. Изменение климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки. В кн.: Изменения климата: влияние внеземных и земных факторов. Г. С. Голицин (ред.). М.: Пробел 2000. С. 11—23.

Жильцова Е. Л., Анисимов О. А. 2009. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами. Метеорология и гидрология. № 10. С. 79—90.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. 2008. М.: Росгидромет. 227 С.

Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010—2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. 2005. М.: Росгидромет. 30 С.

Mitchell T. D. and Jones P. D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. Int. J. Climatology. No. 6. PP. 693—712.

New M., Hulme M., and Jones P. 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology. J. Climate. No. 3. PP. 829—856.

Solomon S., Manning M., Qin D., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., and Miller H. L. (eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Cambridge: Cambridge University Press. 881 P.