

**В.А. Кокорев<sup>1</sup>, А.Б. Шерстюков<sup>2</sup>**

## **О МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ И БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

### METEOROLOGICAL DATA FOR STUDYING THE CURRENT AND PROJECTED FOR THE FUTURE CLIMATE CHANGE IN RUSSIA

*Сеть наблюдений Росгидромета насчитывает более 1600 действующих метеостанций, многие станции имеют длительные ряды наблюдений, которые можно использовать для изучения изменений климата за последнее столетие. Для перспективных оценок изменений климата используют проекции температуры воздуха и осадков на середину и конец 21 века, получаемые путем расчетов по гидродинамическим моделям общей циркуляции атмосферы и океана. В статье проводится анализ имеющихся в свободном доступе данных наблюдений и модельных климатических проекций для России. Проводится сравнение рассчитанных по моделям региональных трендов температур и осадков с наблюдениями за исторический период, по результатам которого отбираются лучшие модели для построения оптимизированной для территории России ансамблевой проекции изменения климата. Осредненные по лучшим моделям проекции температуры воздуха и осадков на середину и конец 21 века для регионов России приводятся в виде карт и таблиц.*

**Ключевые слова:** данные наблюдений, температура воздуха, осадки, климатические проекции, оптимальный ансамбль.

*Russian Federal meteorological network consists of more than 1600 weather stations many stations have a long series of observations that can be used for the study of climate change over the last century. For projections of climate change using projections of air temperature and precipitation in the middle and the end of the 21st century, obtained by calculations of hydrodynamic models of the general circulation of the atmosphere and ocean. The article analyzes freely available observational data and model climate projections for Russia. A comparison is calculated using the model of the regional trends of temperature and precipitation observations in the historical period, the results of which are selected to build the best models optimized for the territory of Russia ensemble climate change projections.*

<sup>1</sup> Кокорев Василий Алексеевич - научный сотрудник Государственного гидрологического института, г. Санкт-Петербург. E-mail: vasilykokorev@gmail.com

Kokorev V.A. – Research State Hydrological Institute, Saint-Petersburg.

<sup>2</sup> Шерстюков Артем Борисович - старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных, г. Обнинск. E-mail: artem@meteo.ru

Sherstiukov A.B. - Senior Researcher Senior Researcher, Obninsk.

*Averaged for the best model projections of temperature and precipitation in the middle and the end of the 21st century for the Russian regions are given in the form of maps and tables.*

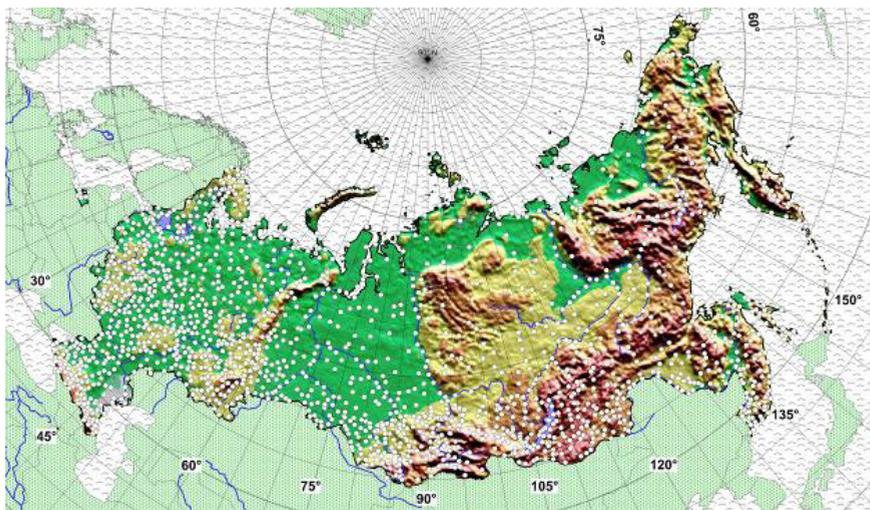
**Keywords:** *observational data, air temperature, precipitation, climatic projections, optimal ensemble.*

## **Введение**

Необходимой предпосылкой изучения изменения климата и его последствий является наличие метеорологических данных за период наблюдений и информации об их ожидаемых изменениях в будущем. Целью статьи является описание имеющихся в свободном доступе массивов данных современных метеонаблюдений на территории России, а также обзор результатов расчетов по гидродинамическим моделям климата, на основе которых строятся проекции на будущее. В статье рассмотрены два важнейшие метеоэлемента – приземная температура воздуха и атмосферные осадки.

Основой получения гидрометеорологической информации является государственная наблюдательная сеть, которая осуществляет более 20 видов наблюдений, в том числе метеорологические, гидрологические, аэрологические, агрометеорологические и морские гидрометеорологические. По состоянию на 1 января 2015 г. сеть включает 1921 метеорологическую станцию и 3079 гидрометеорологических постов, 115 аэрологических станций, 631 пост наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха (в 225 городах), 1820 пунктов гидрохимических и 2492 створов гидробиологических наблюдений поверхностных вод суши, 321 гидрохимические станции в прибрежных районах 9 морей (рис. 1). В 1291 пункте осуществляются наблюдения за радиоактивным загрязнением окружающей среды [9]. Из общего числа станций 454 являются реперными. Они осуществляют полную программу длительных наблюдений на однородной в отношении метеорологического режима территории и не подлежат закрытию и переносу.

В свободном доступе имеются данные о температуре воздуха и почвы на глубинах до 320 см, осадках, снежном покрове, атмосферном давлении на уровне станции, упругости водяного пара, направлении и скорости ветра, продолжительности солнечного сияния. Большинство метеорологических параметров измеряется 8 раз в сутки, получаемые данные носят название срочных. Некоторые характеристики, такие как температура почвы на глубинах, снежный покров и ряд других, имеют более редкую дискретность измерений, от суточной до одного раза за 10 суток. На основе обработки срочных данных впоследствии формируются массивы суточных (как правило, с расчетом максимальной, минимальной и средней за сутки величины параметра) и месячных данных.



**Рис. 1.** Основная наземная сеть Росгидромета, содержащая 1921 станцию

В исследованиях последствий изменений климата наиболее часто используются два метеорологических параметра, температура воздуха и атмосферные осадки. Имеется несколько массивов данных, подготовленных в институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ) – <http://www.igce.ru>, в главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (ГГО) – <http://voeikovmgo.ru> и во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД) – <http://meteo.ru>. Массив ИГКЭ содержит данные месячной дискретности за длительный период по 455 метеостанциям на территории России и соседних стран (из них российских станций – 310). Они используются в оперативно действующей технологии мониторинга приземного климата России. Данные об осадках по 457 станциям России также готовят и в ГГО, однако методики формирования массивов несколько различаются [1]. В массиве ИГКЭ данные дождемера о месячных суммах осадков приведены к показаниям осадкомера (по методике Ц.А. Швер) и в них введены стандартные поправки на смачивание. Данные же ГГО скорректированы по методике, учитывающей влияние всех факторов искажения результатов измерения осадков, в том числе и основного — аэродинамического. В основу корректировки положены эмпирические зависимости между погрешностями измерения осадков и метеорологическими величинами, наблюдаемыми в период их выпадения [1][1].

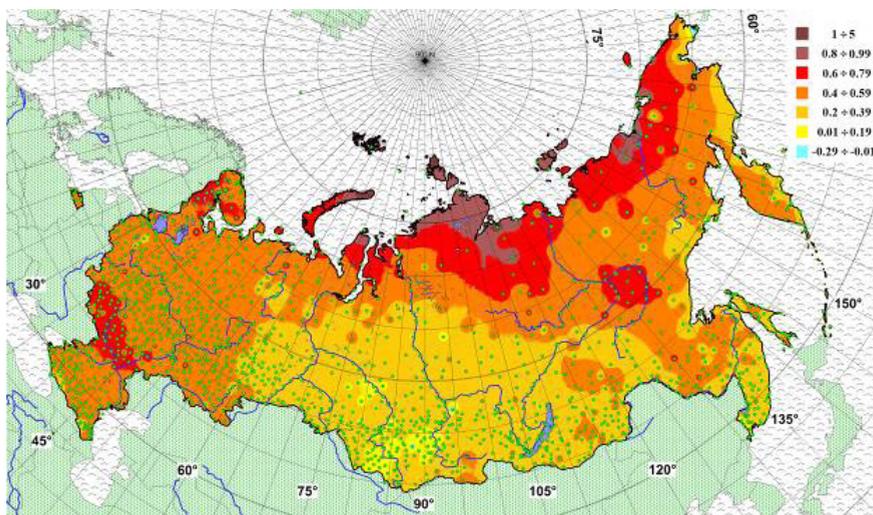
Наибольший объем данных по различным метеорологическим параметрам срочного, суточного и месячного разрешения по 600 метеостанциям России представлен на сайте ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data>). Срочные наблюдения представлены за период после 1966 года. Для изучения многолетнемерзлых грунтов особый интерес представляет массив суточных значений температуры почвы за период с 1963 года под естественным покровом на стандартных глубинах 2, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 120, 160, 240 и 320 см.

### Современные тренды температуры воздуха и осадков.

Тенденции изменения климата обычно оценивают величиной линейного тренда среднегодовых и среднесезонных значений метеорологических величин, главным образом температуры воздуха и количества атмосферных осадков. Представляют интерес также тренды экстремумов, таких как максимальная и минимальная за год среднемесячные температуры. Ниже представлены выборочные карты трендов температуры воздуха и атмосферных осадков для сезонов с наиболее ярко выраженными изменениями, а также для года в целом, построенные по данным ВНИИГМИ-МЦД за период 1976 – 2014 гг.

#### Температура воздуха.

Наибольшие изменения среднегодовой температуры воздуха в рассматриваемый период произошли в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, особенно в северных частях регионов (рис. 2). Потепление здесь составило от 0,4 до 0,8°C/10 лет, в отдельных регионах до 1°C/10 лет. На ЕТР и в Западной Сибири также наблюдаются положительные тренды, интенсивность потепления составляет от 0,2 до 0,6°C/10 лет.

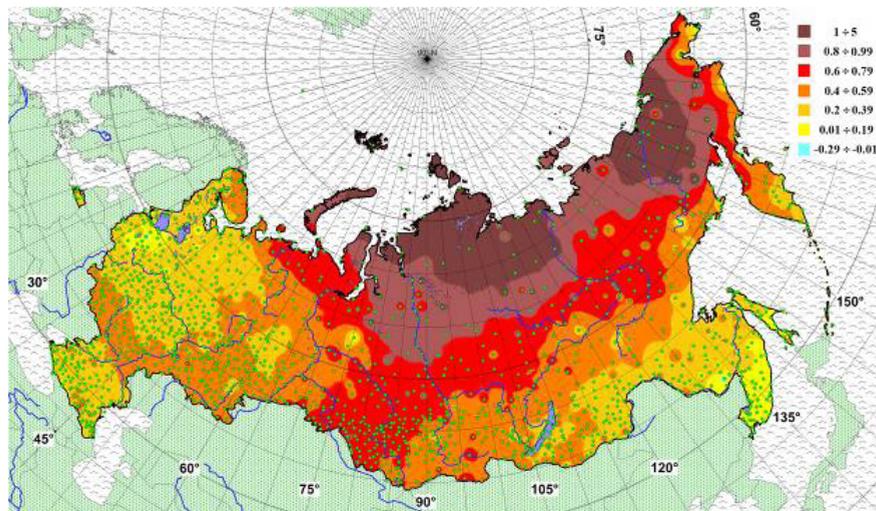


**Рис. 2.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 – 2014 гг. (°C за 10 лет)

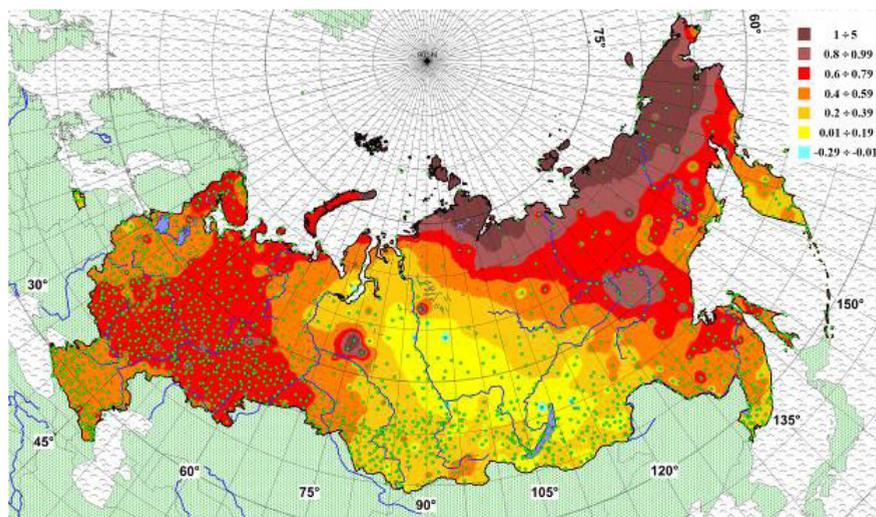
Наиболее существенные изменения сезонных температур происходили весной и осенью, притом, что ранее по данным за вторую половину XX века наибольшие изменения отмечались зимой [5]. Весной отмечается самое интенсивное и обширное потепление воздуха (рис. 3). В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке севернее 65° с.ш. тренд составляет от 0,8 до 1°C/10 лет, в отдельных очагах превышает 1°C/10 лет. В Западной Сибири тренд температуры находится в пределах от 0,4 до 0,8°C/10 лет, на ЕТР преобладает повышение воздуха от 0,2 до 0,4°C/10 лет.

Осенью самое обширное повышение температуры воздуха произошло на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири, преобладает тренд от 0,4 до 0,8°C/10 лет (рис. 4). При этом в северных частях этих регионов повышение температуры достигает 1°C/10

лет. Второй очаг повышения температуры находится на ЕТР и на юге Западной Сибири с трендами 0,4 до 0,8°C/10 лет.

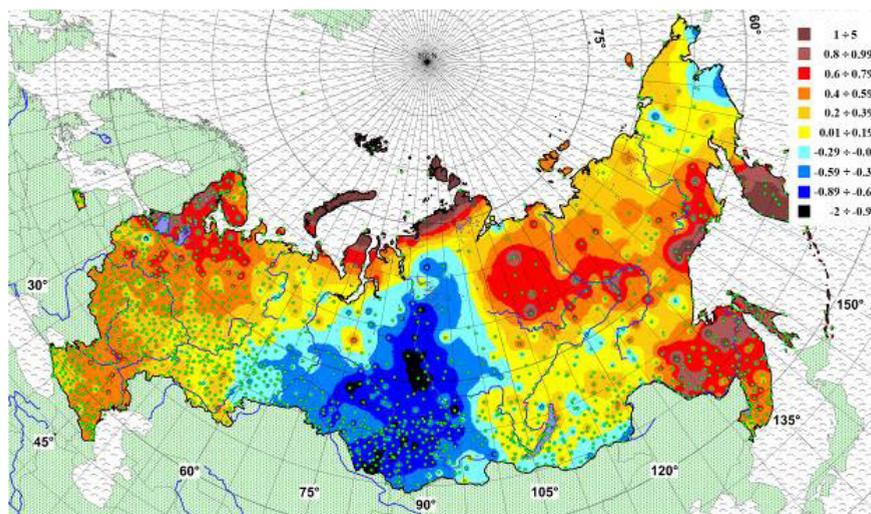


**Рис. 3.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда температуры воздуха за 1976 – 2014 гг. Весна (°C за 10 лет)



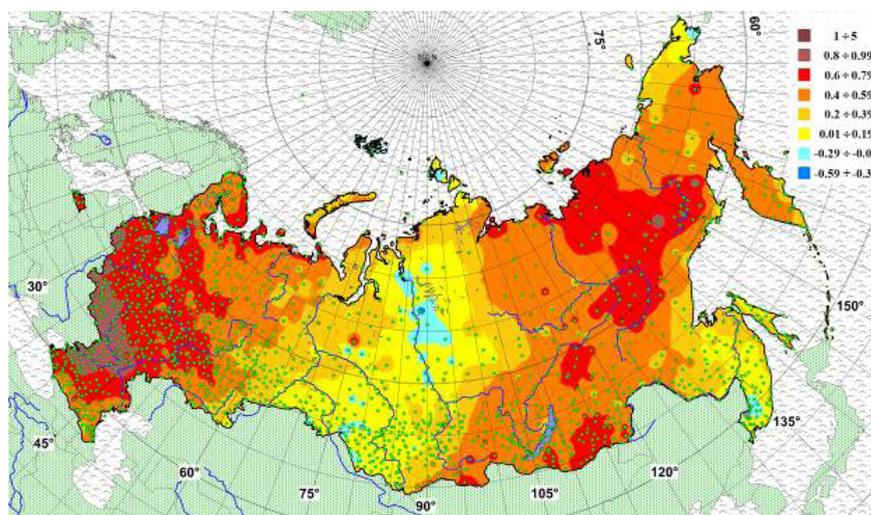
**Рис. 4.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда температуры воздуха за 1976 – 2014 гг. Осень (°C за 10 лет)

На рисунке 5 показаны тренды минимальных температур. Область наибольших отрицательных трендов от -0,6 до -0,9°C/10 лет расположена между 75° и 95° в.д. В северных районах ЕТР, а также южнее 105° в.д. в центральной части Восточной Сибири наблюдается повышение минимальных температур со скоростью от 0,4 до 0,8°C/10 лет.



**Рис. 5.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда минимальных за год температур воздуха за 1976 – 2014 гг. (°C за 10 лет)

Тренды максимальных температур воздуха представлены на рис. 6. Наиболее интенсивное повышение максимальной температуры отмечается на ЕТР, тренды от 0,4 до 1 °C/10 лет, а также в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, тренды от 0,4 до 0,8 °C/10 лет. Область слабого роста максимальных температур воздуха (от 0 до 0,2 °C/10 лет) совпадает с областью наиболее интенсивных отрицательных трендов минимальных температур воздуха и расположена между 75° и 95° в.д.

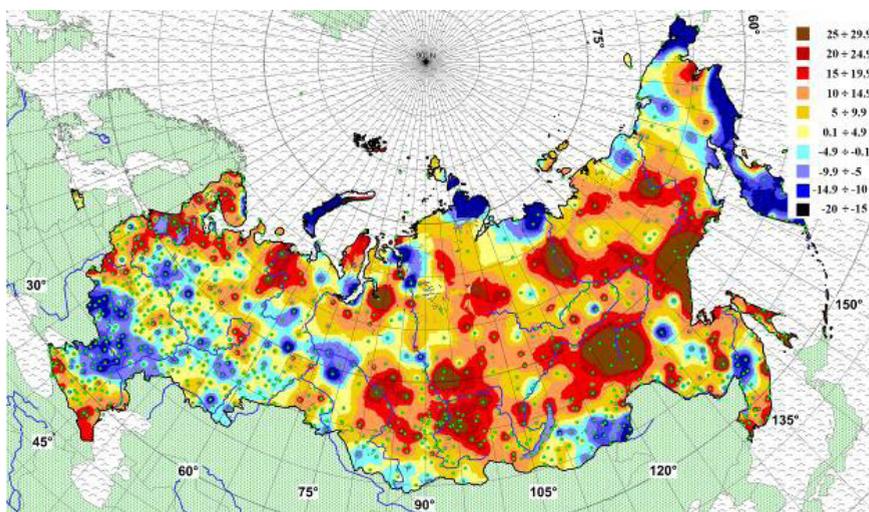


**Рис. 6.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда максимальных за год температур воздуха за 1976 – 2014 гг. (°C за 10 лет)

Таким образом, самое интенсивное потепление воздуха наблюдается в переходные сезоны (весна и осень), область его распространения охватывает криолитозону. Интенсивное потепление воздуха весной в совокупности с умеренным повышением температуры воздуха летом создают предпосылки для увеличения глубины сезонного оттаивания.

#### Осадки.

В целом на территории России преобладает увеличение годовых сумм осадков (рис. 7). В северных районах ЕТР оно составляет от 5 до 20 мм/10 лет, притом, что в ряде центральных и южных районов ЕТР наблюдаются очаги уменьшения осадков на величину до 10 мм/10 лет. В Западной и Восточной Сибири и в некоторых районах на Дальнем Востоке преобладает увеличение годовых сумм осадков на величину от 5 до 15 мм/10 лет, при этом в некоторых районах на юге и в центре тех же районов наблюдается увеличение осадков на 15 – 30 мм/10 лет. На Чукотке, Камчатке и в Приамурье наблюдается уменьшение годовых осадков на величину до 20 мм/10 лет.



**Рис. 7.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда годовых сумм осадков в мм/10 лет за 1976 – 2014 гг.

Анализ сезонных данных показал, что в районах распространения многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) увеличение осадков произошло преимущественно в летний сезон. Зимой осадки даже несколько уменьшились в средних широтах Сибири. Уменьшение зимних осадков способствует ослаблению теплоизолирующего слоя снежного покрова и усилению связи между изменениями температуры воздуха холодного периода и температуры ММГ.

#### **Сравнение данных глобальных сеточных архивов с наблюдениями на метеостанциях**

В последние годы широкое применение получили глобальные климатические архивы, в которых первичные наблюдения на метеостанциях подвергнуты обработке

и приведены к узлам регулярной сетки. При построении сеточных архивов используются различные методы пространственного обобщения, от пространственной интерполяции до сложного модельного реанализа. Вопрос о том, насколько хорошо такие информационные продукты описывают климат России и её регионов, в значительной степени остаётся открытым. В этом разделе оценивается качество четырех общедоступных сеточных архивов приземной температуры воздуха и осадков применительно к территории России и сопредельных государств бывшего СССР. Первые два архива, CRU TS [12] и CRUTEM 4.3.0.0 [14], были получены интерполяцией данных наблюдений на метеостанциях. Два другие получены посредством модельного реанализа (Era-Interim [11] и NCEP2 [15]). Существует несколько версий каждого из этих постоянно пополняемых и продлеваемых архивов, при этом пространственное разрешение сеток в различных версиях составляет  $5^\circ$  для CRUTEM4,  $0,5^\circ$  для CRU TS, около  $1,8^\circ$  для NCEP2, и около  $0,7^\circ$  для Era-Interim. К особенностям архивов можно отнести следующее.

Архив CRUTEM4 разработан и поддерживается в университете Восточной Англии, Великобритания. Он содержит среднемесячные данные, начиная с 1851 по настоящее время, и, ежемесячно продлевается с задержкой в два месяца. При создании четвёртой версии архива было использовано большее количество данных по Российской Арктике в сравнении с предыдущими версиями, что заметно улучшило качество архива в этом районе, а также увеличило оценку полушарной температуры на  $0,1^\circ\text{C}$ . Данные представлены в виде аномалий метеорологических характеристик по отношению к периоду 1961-1990 гг. в ячейках широтно-долготной сетки  $5^\circ \times 5^\circ$ . Значения температур приведены к высотам узлов сетки с использованием топографической модели, которая также входит в сопутствующую документацию. Архив осадков велся до 2000 года и в настоящее время не поддерживается, поэтому он не рассматривается в статье.

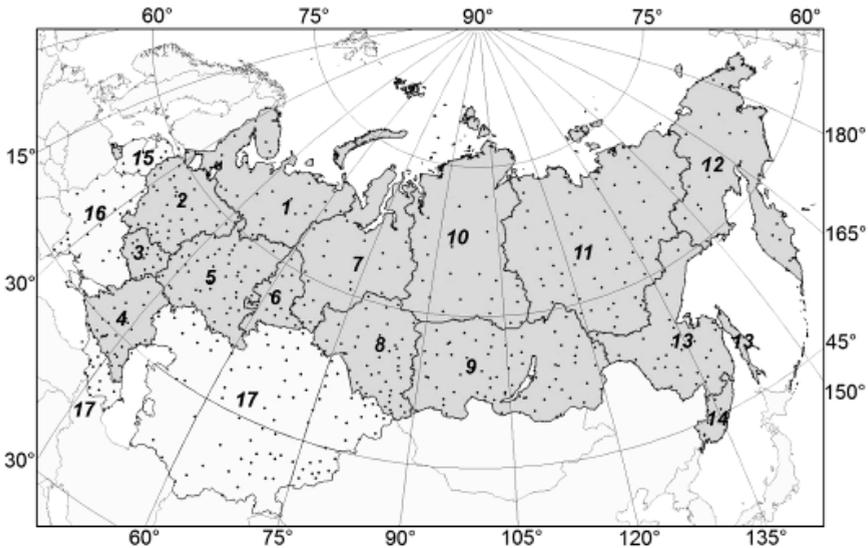
Архив CRU TS 3.22 обладает на порядок более высоким разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , что достигнуто за счёт использования сплайновой интерполяции. Также данный архив содержит данные по максимальной и минимальной температурам, давлению и осадкам.

Архив Era-Interim [11] был получен при помощи модельного реанализа в Европейском центре прогноза погоды. Архив Era-Interim позиционируется как промежуточный шаг между архивом ERA-40, который считается устаревшим, и архивом, который должен его заменить, отсюда и происходит английское название архива. Era-Interim содержит метеоданные с 12-ти часовым временным разрешением в узлах сетки T255 (примерно  $80 \times 80$  км) за период с 1979г по настоящее время (архив обновляется в реальном времени). Также существует вариант архива с месячным разрешением, он и был использован в данной работе.

Архив данных реанализа NCEP2 [15], созданный в США, использует сетку  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  и охватывает период с 1979 по 2014 гг. Существуют планы по расширению архива и включению данных, начиная с 1950. Основное отличие от ERA в использовании спутниковых наблюдений за температурой в добавок к данным наблюдений на станциях.

Нами была оценена точность этих архивов для территории России. Ранее в работах [7,10] уже проводилась оценка предыдущих версий трех из этих архивов (кроме

CRUTEM). В отличие от прежних работ, мы использовали методологию, которая явно учитывает, что наблюдения на метеостанциях представляют собой точечные данные, а данные сеточных архивов – площадные. Для сравнения и те и другие осреднялись по регионам, которые имеют достаточно большую площадь и характеризуются однородными климатическими изменениями в современный период. Создание такого районирования, показанного на рис. 8, являлось самостоятельной задачей, в процессе решения которой нами был проведен анализ пространственных закономерностей полей температуры воздуха и осадков. Используемые для этого методы и полученные результаты, в том числе обоснование районирования на рис. 8, даны в наших предшествующих публикациях [2,7,10].



**Рис. 8.** Разделение территории России на регионы, характеризующиеся однородными изменениями температуры воздуха в современный период

Районирование, показанное на рисунке 8, максимально приближено к административному делению России на Федеральные округа, но содержит больше территориальных единиц, поскольку в каждом из крупных округов (Северо-Западный, Центральный, Уральский, Сибирский, Дальневосточный) были выделены несколько районов, характеризующихся однородностью современных изменений климата. Оно удовлетворяет главному требованию, согласно которому внутрирегиональные коэффициенты корреляции рядов температуры, рассчитанные для различных пар станций в пределах одного региона, должны быть заметно выше, чем межрегиональные. Для показанного на рис. 8 районирования это требование выполняется как для сезонных, так и для среднегодовой температуры воздуха. Среднерегionalные коэффициенты корреляции соответствующих рядов наблюдений за период 1970-2012 гг. изменяются в пределах от 0,72 до 0,83 [2]. Нами предпринимались попытки создать аналогичное районирование в отношении осадков, но этого сделать не удалось. Поскольку поле осадков не обладает свойством непрерывности, для них нельзя надеж-

но оценить пространственную корреляционную функцию, на основе которой определяются границы регионов.

Оценивалась точность воспроизведения следующих характеристик, наиболее часто применяемых в задачах прикладной климатологии:

- среднегодовая и сезонные температуры,
- суммы температур вегетационного и биологически активного периодов (с температурами выше 5°C и 10°C),
- дефицит тепла (суммы температур ниже 8°C),
- сезонные и годовые суммы осадков.

Ниже приведены выборочные результаты сравнения этих характеристик, рассчитанных по сеточным архивам и по фактическим данным наблюдений, осредненные за десятилетие 1981-1990 гг. Этот период характеризовался наименьшим числом пропусков наблюдений. Аналогичные результаты были получены и для других интервалов времени (в данной статье не представлены), при этом пространственные закономерности распределения погрешностей архивов в целом сохранялись теми же, что и в выбранный нами период.

Таблица 1

**Среднерегиональные сезонные нормы температур, суммы температур за вегетационный и активный период и дефицит тепла за период 1981-1990 гг. по данным различных архивов**

		Регионы													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Зима	Наблюдения	-13.0	-7.8	-6.3	-2.2	-10.6	-13.6	-19.6	-15.6	-21.5	-27.3	-34.1	-22.8	-22.1	-13.9
	CRU ts 3.22	-14.9	-8.3	-6.4	-3.5	-11.1	-14.1	-19.8	-16.4	-23.8	-29.5	-37.4	-25.4	-26.0	-14.1
	CRUTEMP4	-14.5	-7.6	-7.1	-3.0	-11.2	-13.8	-19.8	-16.5	-24.1	-27.5	-36.8	-23.5	-20.9	
	Era-Interim	-14.0	-8.2	-6.5	-3.2	-11.0	-13.5	-20.3	-15.6	-21.2	-28.2	-34.0	-25.5	-25.0	-15.2
	NCEP2	-13.3	-9.0	-7.7	-3.9	-11.2	-13.0	-17.7	-14.4	-18.9	-24.0	-28.9	-22.4	-23.1	-15.2
Весна	Наблюдения	-1.1	4.8	6.8	8.5	4.0	2.4	-5.2	1.0	-1.1	-8.9	-9.6	-8.9	-0.7	4.2
	CRU ts 3.22	-1.6	4.8	7.1	8.7	4.0	2.3	-5.6	0.7	-2.8	-12.7	-12.6	-12.7	-4.0	2.3
	CRUTEMP4	-1.6	5.5	6.5	8.3	4.1	2.6	-5.7	0.6	-3.0	-10.8	-12.5	-11.4	-2.1	
	Era-Interim	-1.6	4.7	6.7	8.8	3.7	2.4	-6.5	0.7	-1.8	-12.4	-11.2	-10.7	-2.3	3.3
	NCEP2	-2.9	3.6	6.3	8.6	2.7	1.4	-6.6	-0.3	-3.7	-12.1	-11.5	-11.4	-4.5	3.9
Лето	Наблюдения	12.7	16.3	18.5	20.6	18.3	17.6	13.8	16.6	14.7	12.3	12.7	10.4	15.9	18.4
	CRU ts 3.22	13.1	16.5	19.2	21.5	18.6	17.7	13.0	17.0	13.9	10.2	11.2	7.9	13.6	16.1
	CRUTEMP4	12.9	17.0	18.9	21.9	18.9	17.9	12.8	16.8	13.8	10.9	10.9	7.9	13.6	
	Era-Interim	12.8	16.3	18.5	21.5	18.0	17.3	13.1	16.3	14.2	9.9	11.3	9.9	14.9	17.8
	NCEP2	12.6	16.5	18.9	21.9	18.2	18.1	12.5	17.1	14.1	9.2	10.7	8.5	14.7	18.5
Осень	Наблюдения	0.5	4.3	5.9	9.4	3.3	1.5	-3.2	0.6	-2.1	-7.8	-11.2	-5.2	-0.8	5.6
	CRU ts 3.22	-0.3	4.3	6.3	9.3	3.3	1.3	-3.2	0.6	-3.5	-10.2	-13.6	-8.1	-4.1	4.4
	CRUTEMP4	-0.1	4.8	5.7	9.5	3.4	1.4	-3.3	0.5	-3.8	-8.6	-13.3	-6.7	-1.1	
	Era-Interim	-0.1	3.9	5.6	9.1	2.9	1.3	-3.6	0.2	-3.0	-9.5	-12.0	-7.6	-4.0	4.0
	NCEP2	-0.5	3.5	5.6	9.4	2.7	1.2	-3.4	0.4	-3.0	-9.0	-11.2	-8.2	-3.9	5.1

Год	Наблюдения	-0.2	4.4	6.2	9.0	3.8	2.0	-3.6	0.6	-2.5	-7.9	-10.6	-6.7	-1.9	3.6
	CRU ts 3.22	-0.9	4.4	6.5	9.0	3.7	1.8	-3.9	0.5	-4.0	-10.6	-13.1	-9.6	-5.2	2.2
	CRUTEMP4	-0.8	4.9	6.0	9.2	3.8	2.0	-4.0	0.3	-4.2	-9.0	-12.9	-8.5	-2.6	
	Era-Interim	-0.7	4.2	6.1	9.0	3.4	1.9	-4.4	0.4	-2.9	-10.1	-11.5	-8.5	-4.1	2.5
	NCEP2	-1.0	3.6	5.7	9.0	3.1	1.9	-3.8	0.7	-2.9	-9.0	-10.2	-8.4	-4.2	3.1
$\Sigma T > 5$	Наблюдения	1412	2323	2834	3392	2504	2249	1397	2044	1700	1153	1208	973	1919	2661
	CRU ts 3.22	1440	2359	2963	3511	2538	2243	1313	2104	1551	870	987	635	1490	2252
	CRUTEMP4	1419	2485	2862	3527	2596	2273	1289	2079	1529	976	953	650	1591	
	Era-Interim	1389	2289	2807	3499	2415	2192	1289	1978	1578	837	1006	867	1672	2471
	NCEP2	1326	2278	2871	3561	2416	2257	1208	2044	1494	762	919	694	1591	2683
$\Sigma T > 10$	Наблюдения	998	1945	2524	3053	2199	1897	1097	1750	1375	861	926	560	1625	2329
	CRU ts 3.22	1052	1989	2671	3212	2231	1899	994	1817	1216	544	687	2	1165	1861
	CRUTEMP4	1016	2129	2566	3209	2301	1924	963	1794	1194	660	634	0	1248	
	Era-Interim	987	1918	2495	3192	2090	1835	989	1677	1249	483	698	423	1379	2128
	NCEP2	946	1944	2583	3268	2128	1960	899	1777	1186	421	607	232	1320	2366
$\Sigma T < 8$	Наблюдения	3005	1884	1598	901	2383	2970	4507	3346	4423	6371	7772	5494	4430	2773
	CRU ts 3.22	3355	1964	1587	1041	2473	3062	4576	3514	4996	7159	8644	6518	5493	2902
	CRUTEMP4	3292	1811	1735	1008	2491	3012	4595	3534	5080	6608	8522	6043	4308	
	Era-Interim	3219	1963	1633	1036	2466	2963	4753	3374	4480	6904	7897	6269	5205	3056
	NCEP2	3153	2155	1906	1163	2572	2954	4314	3240	4271	6188	7005	5863	5053	3045

В таблице 1 показаны значения температур по календарным сезонам для 14 российских регионов, вычисленные по данным четырех рассматриваемых сеточных архивов, а также по архиву метеонаблюдений ВНИИГМИ-МЦД, описанному в первой части статьи. В регионе 14 отсутствует значение по архиву CRUTEMP4 т.к. из-за грубого пространственного разрешения данного архива в небольшой по площади район не попадает ни одного узла сетки. Можно отметить, что в среднем сеточные архивы дают значения температуры на 0,5-1°C ниже, чем архив ВНИИГМИ-МЦД. В отдельных регионах сеточные архивы незначительно завышают фактические температуры. Все сеточные архивы дают более точные значения для среднегодовой температуры, чем для сезонных, хотя для архива Era-Interim это отличие незначительно. Архивы Era-Interim и CRUTEMP4 дают близкие результаты, как по величине погрешности, так и по картине ее пространственного распределения. Архивы NCEP2 и CRU TS показывают большие отличия от архива ВНИИГМИ-МЦД, погрешность достигает 3-5°C. Интерес также представляет географическое распределение выявленных различий, сеточные архивы дают значения температуры выше рассчитанных по данным ВНИИГМИ-МЦД в регионах 1-8 (Европейская часть), и заметно ниже в регионах 9-14 (Азиатская часть). Отличия заметно больше в Азиатской части России по сравнению с Европейской частью. Данные результаты полностью согласуются с теми, что были получены в статье [2].

Обращают на себя внимание значительные отличия между архивами CRUTEMP4 и CRU TS3 в отдельных регионах. Наибольшее расхождение оценок различных ар-

живов наблюдается в регионе 14 и прилежащих к нему территориях. Похожее пространственное распределение наблюдается и в данных климатических моделей [8]. Показательно, что средний коэффициент парной корреляции рядов температуры по станциями этого региона наименьший среди рассматриваемых регионов [3], что свидетельствует о сложной мозаичной картине изменений температурного поля. В регионах 1-9 отличия между архивами менее значительны и составляют в большинстве случаев не более 0,5°C, за исключением архива NCEP2 который систематически даёт заметные отличия от остальных архивов.

В целом лучший результат показывает архив Era-Interim, что совпадает с выводом статьи [2], где наилучший результат показала предыдущая версия данного архива – ERA-40. Архив CRUTEM4 показывает близкий результат, однако обладает крайне низким пространственным разрешением, что ограничивает его использование в региональных исследованиях.

Анализ воспроизведения годовых сумм осадков, проведенный в [2], показал, что архивы, основанные на реанализа, обладают большой погрешностью. В настоящее время значительные усилия направлены на улучшение воспроизведения осадков синоптическими и климатическими моделям, некоторые группы выпускают экспериментальные версии моделей с улучшенной параметризацией осадков [11,13]. Несмотря на это, в настоящее время архивы, основанные на реанализе, значительно уступают в точности воспроизведения осадков архивам, использующим методы интерполяции данных метеостанций.

### **Проекция температуры воздуха и осадков**

Для оценки будущих изменений климата используют гидродинамические модели, результаты расчетов по которым принято называть климатическими проекциями. Несмотря на постоянное улучшение их качества, неопределённость проекций продолжает оставаться высокой по двух основным причинам. Первая причина – несовершенство моделей, результаты которых заметно различаются между собой. Второй причиной является отсутствие принципиальной возможности предсказать будущее развитие человечества и реалистично оценить эмиссии парниковых газов (ПГ), по которым модели рассчитывают воздействие на климат. Для оценки будущего содержания ПГ в атмосфере принято использовать условные сценарии. Были разработаны четыре сценария эмиссии ПГ на период 2006-2100 гг. для различных вариантов глобального социально-экономического развития, получившие обозначения RCP8.5 [19], RCP6 [17], RCP4.5 [21] и RCP2.6 [22]. Цифры в обозначениях указывают радиационное воздействие, т.е. изменение радиационного баланса поверхности Земли к 2100 году (в Вт/м<sup>2</sup>), обусловленное изменением содержания ПГ в атмосфере за счет соответствующих эмиссий.

В рамках завершившейся пятой фазы проекта сравнения климатических моделей CMIP5 были проведены унифицированные расчеты с использованием полного набора сценариев RCP, в которых участвовали около 40 моделей. «Исторические» расчеты проводились для периода 1850-2005 гг., прогнозные – для периода 2006-2100 гг. Все результаты имеются в свободном доступе в формате netCDF, который хранит в

одном файле, как сами данные, так и метаданные к ним. Из-за большого объема данные хранятся распределенно на серверах институтов, участвующих в проектах. Поиск по всем серверам доступен с <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>. Справочная информация размещена на сайте [https://github.com/ESGF/esgf.github.io/wiki/ESGF\\_User\\_Guide](https://github.com/ESGF/esgf.github.io/wiki/ESGF_User_Guide). Для работы с данными были созданы специальные инструменты, перечень которых приведен на сайте разработчика формата netCDF (<http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/software.html>). Формат поддерживается большим количеством научного ПО, включая MATLAB, ESRI, Mathematica; существуют библиотеки для работы с форматом на C/C++, Fortran, Java, Python, R, Perl и других языках.

Для уменьшения неопределенности климатических проекций, связанной со случайными ошибками индивидуальных моделей, широкое распространение получил ансамблевый метод, состоящий в том, что результаты большого числа моделей усредняются[11]. До недавнего времени считалось, что чем больше моделей входит в ансамбль, тем более точным является результат. Однако в ряде работ [4,16] была показана целесообразность проводить тестирование и исключать из ансамбля модели, которые в исторических расчетах воспроизводят изменения климата в рассматриваемом регионе с большой ошибкой. Нами было проведено тестирование 46 климатических моделей последнего поколения CMIP5, по параметрам, перечисленным в предыдущем разделе, в результате которого были отбракованы 13 моделей, обладающие наибольшей ошибкой воспроизведения современных трендов температуры на территории России. Среди оставшихся 33 моделей были выбраны 8 с наилучшими показателями. Сопоставление ансамблей, использующих различное число отобранных моделей, выявило незначительные отличия между ними. Как правило, модели занимающие первые строки рейтинга, дают несколько меньшее изменение в 21 веке, чем модели из середины списка. Количество моделей, входящих в итоговый оптимизированный ансамбль, выбрано отчасти произвольно. Дилемма заключалась в том, чтобы минимизировать случайные ошибки, используя наибольшее количество моделей, и не потерять отличия в пространственном распределении исследуемых величин.

В таблице 2 приведено сравнение моделей по одному из параметров – многолетнему тренду годовой температуры за период 1981-2005. Для сопоставимости в сравнение добавлены сеточные архивы, рассмотренные в предыдущем разделе. Используется методика, описанная в [8], величина неопределённости рассчитывается как разница модельного и наблюдаемого трендов делённая на их сумму. Можно отметить, что лучшие модели дают результат, сопоставимый с некоторыми сеточными архивами, однако лучшие архивы обладают заметно меньшей погрешностью, чем все модели. При переходе к сезонным температурам точность воспроизведения трендов моделями уменьшается больше, чем у сеточных архивов, но лучшие модели всё же дают погрешность, близкую к погрешности сеточных архивов с низким рейтингом.

Таблица 2

**Тренды годовой температуры воздуха по регионам России за период 1981-2005 гг.  
по различным моделям и сеточным архивам (выделены жирным), °С/10 лет**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ранг
Наблюдения	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.00
ACCESS1.3	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0.30
ACCESS1-0	0.9	1.0	1.1	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	0.5	0.5	0.32
bcc-csm1-1	0.8	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.8	0.6	0.5	0.7	0.5	0.3	0.3	0.5	0.25
bcc-csm1-1-m	0.0	0.3	0.6	0.5	0.2	0.1	0.1	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.2	0.29
BNU-ESM	0.4	0.1	0.3	0.4	0.3	0.5	0.6	0.9	1.0	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.30
CanCM4	1.3	0.9	0.8	0.6	0.9	0.8	1.0	0.5	0.4	0.6	0.5	0.7	0.5	0.4	0.30
CanESM2	0.9	1.0	0.9	0.7	1.0	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	1.1	0.6	0.6	0.35
CCSM4	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	0.5	0.7	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.18
CESM1-BGC	0.8	0.7	0.7	0.5	0.8	0.9	0.9	0.5	0.5	0.7	0.8	0.8	0.4	0.5	0.28
CESM1-CAM5	-0.2	0.2	0.4	0.4	0.1	-0.1	-0.5	-0.2	0.0	-0.1	0.4	0.4	0.0	0.0	1.68
CESM1-FASTCHEM	0.6	0.5	0.4	0.7	0.7	0.6	0.8	0.2	0.1	0.9	0.5	-0.1	0.2	-0.1	0.51
CESM1-WACCM	0.6	0.3	0.2	0.2	0.5	0.6	0.8	0.5	0.5	1.0	1.0	0.9	0.6	0.4	0.29
CMCC-CESM	0.6	0.3	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.82
CMCC-CM	1.1	0.9	0.8	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	0.6	0.0	0.5	0.9	0.41
CMCC-CMS	0.1	0.5	0.6	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.34
CNRM-CM5	0.7	0.6	0.4	0.1	0.5	0.5	0.8	0.7	0.8	0.9	0.8	1.1	0.7	0.5	0.34
CNRM-CM5-2	0.7	0.6	0.5	0.5	0.7	0.6	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.1	0.7	0.1	0.2	0.46
<b>CRU TS 3.22</b>	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.14
<b>CRUTEMP4</b>	0.3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.2	0.1	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4		0.09
CSIRO-Mk3-6-0	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	1.1	0.8	0.6	0.9	0.6	0.4	0.4	0.2	0.26
EC-EARTH	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.5	0.5	0.8	0.5	0.6	0.8	0.4	0.15
<b>ERA-Interim</b>	0.3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.05
FGOALS_g2	1.1	1.5	1.2	0.4	0.9	1.0	0.9	0.5	0.4	0.5	0.4	-0.2	0.5	0.8	0.51
FIO-ESM	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.5	0.4	0.7	0.3	0.2	0.2	0.2	0.48
GFDL-CM2p1	-0.1	0.4	0.5	0.6	0.3	0.1	-0.2	0.3	0.2	0.1	0.5	1.0	0.4	0.1	0.78
GFDL-CM3	-0.4	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3	-0.1	0.5	0.4	-0.1	-0.1	0.9	0.2	0.1	1.50
GFDL-ESM2G	0.1	0.0	-0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.8	1.5	0.6	0.2	0.54
GFDL-ESM2M	-0.2	-0.5	-0.3	-0.2	-0.8	-1.0	-0.1	-0.4	0.1	0.2	0.6	0.9	0.4	0.0	4.06
GISS-E2-H	0.6	0.5	0.4	0.4	0.7	0.7	0.4	0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.3	0.1	0.28
GISS-E2-H-CC	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5	0.19
GISS-E2-R	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.5	0.9	0.7	0.8	0.3	0.3	0.27
GISS-E2-R-CC	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.1	0.5	0.6	0.4	0.2	0.65
HadCM3	0.7	0.5	0.5	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	1.0	0.9	0.7	0.7	0.24
HadGEM2-AO	0.7	1.2	1.2	0.7	0.9	0.8	1.0	1.2	1.0	1.3	1.1	0.8	0.6	0.3	0.42
HadGEM2-CC	0.8	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.5	0.1	0.1	0.5	0.7	0.5	0.5	0.2	0.44
HadGEM2-ES	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.6	0.8	1.1	0.6	0.7	0.18
inmcm4	0.0	-0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.3	-0.1	-0.1	0.3	0.2	0.2	-0.2	0.1	1.06

IPSL-CM5A-LR	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.7	0.4	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.16
IPSL-CM5A-MR	1.1	0.6	0.4	0.4	0.7	0.8	1.0	0.6	0.4	0.8	0.5	0.3	0.3	0.3	0.27
IPSL-CM5B-LR	0.9	0.3	-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.2	-0.4	-0.3	-0.1	0.0	0.3	-0.1	-0.1	2.62
MIROC4h	-0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.44
MIROC5	2.0	1.6	1.5	1.2	1.4	1.3	1.7	1.3	0.6	1.4	1.2	0.7	0.5	0.3	0.48
MIROC-ESM	0.4	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.3	0.6	0.3	0.2	0.14
MIROC-ESM-CHEM	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	0.6	0.4	0.1	0.4	0.3	0.5	0.0	0.1	0.36
MPI-ESM-LR	-0.7	-0.4	-0.1	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	0.1	0.5	0.8	0.5	0.3	76.20
MPI-ESM-MR	0.2	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.8	0.6	0.5	0.7	0.8	0.3	0.3	0.23
MPI-ESM-P	0.6	0.8	1.0	0.8	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	0.6	0.3	0.3	0.5	0.33
MRI-CGCM3	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	-0.2	-0.2	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	2.42
MRI-ESM1	1.1	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	1.0	0.8	0.7	1.2	1.0	0.7	0.7	0.6	0.38
<b>NCEP2</b>	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3	0.8	0.4	0.4	0.20
NorESM1-M	1.0	1.0	0.6	0.4	0.8	0.7	0.5	0.7	0.6	0.5	0.7	0.9	0.4	0.5	0.27
NorESM1-ME	1.0	0.5	0.4	0.2	0.6	0.6	0.9	0.5	0.2	0.3	0.1	0.5	0.2	0.2	0.27

Далее в работе был использован оптимальный ансамбль из 8 моделей. На рисунках 9 и 10 приведены прогнозируемые на середину 21 века аномалии температуры воздуха и осадков.

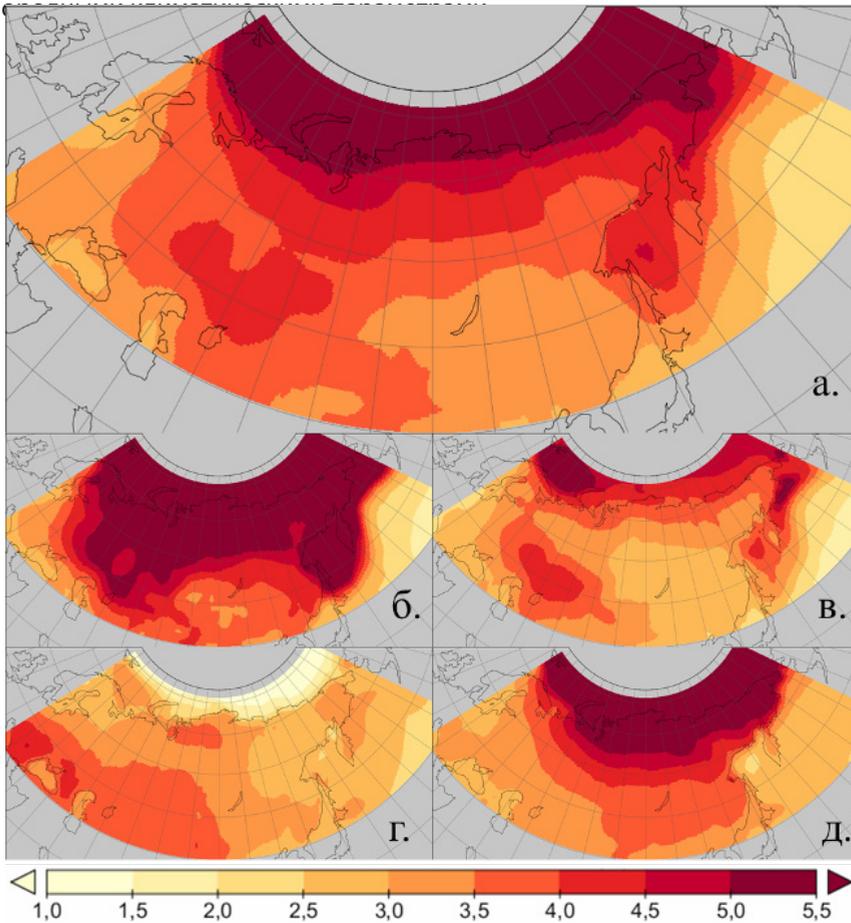
Характеризуя проекции температуры воздуха, можно отметить, что они в среднем за год подчиняются широтной зональности, увеличиваясь от низких широт к высоким. В континентальной Арктической области к середине 21 века прогнозируется увеличение среднегодовой температуры на 4-5°C, за исключением районов, примыкающих к арктическому побережью, где температура может вырасти на 5-6°C по отношению к норме 1961-1990. Отметим, что все представленные в этом разделе результаты были получены с использованием наиболее агрессивного сценария эмиссии парниковых газов RCP-8.5, и по этой причине их следует рассматривать как верхнюю оценку возможного диапазона.

Наибольшим, согласно проекции, будет рост температуры зимой и осенью. Зимние температуры будут расти наиболее сильно на Европейской территории России (ЕТР), в то время как максимальный рост осенних температур ожидается в центральной Сибири. Летние температуры будут меняться меньше, чем в остальные сезоны.

Годовые суммы осадков будут увеличиваться повсеместно в арктической области России. Сезонные осадки будут также увеличиваться, но с разной скоростью в разных регионах. Можно отметить прогнозируемый сильный рост осенних и зимних осадков на ЕТР по сравнению с их умеренным увеличением в Сибири.

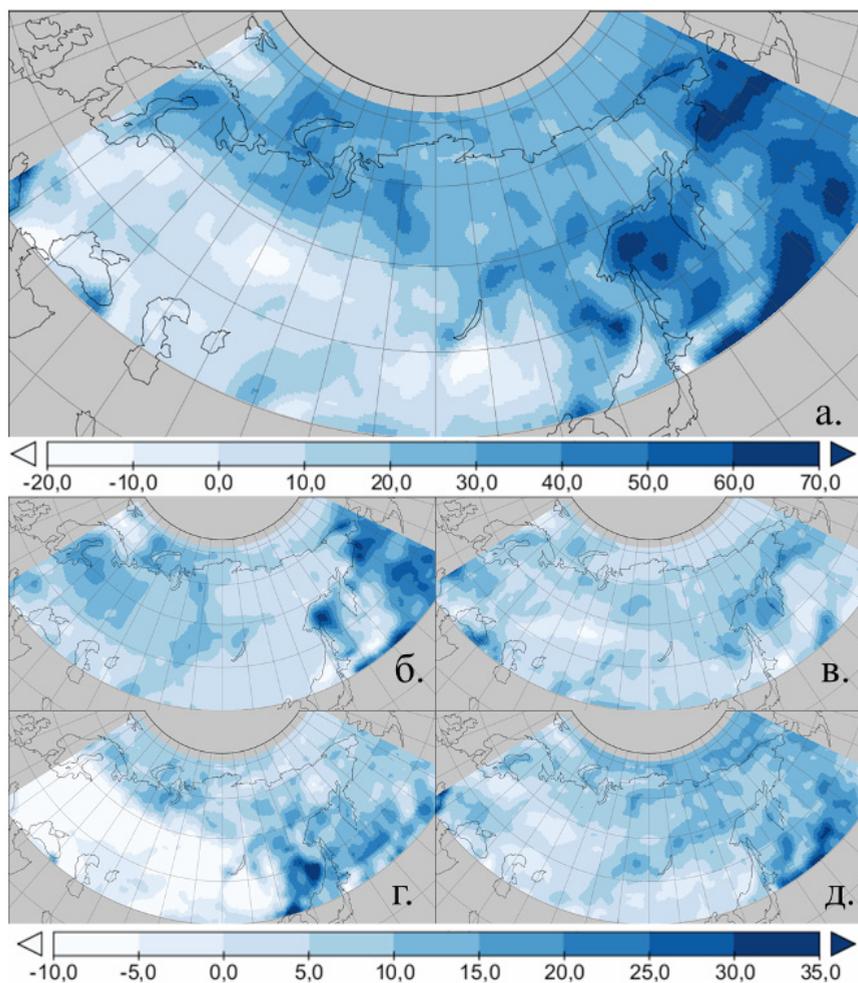
Данные модельных расчётов имеют свою область применимости, в рамках которой они удовлетворительно воспроизводят реальную картину. При выходе за эти рамки модельные ошибки начинают доминировать и результаты расчетов перестают иметь какую-либо ценность. По мере совершенствования моделей область их применения расширяется. Если модели предыдущего поколения CMIP3 удовлетвори-

тельно воспроизводили многолетние тренды температуры в масштабах континента [6,20], то модели поколения CMIP5 способны воспроизводить параметры температуры в пространственных масштабах от тысячи километров [18]. Временное разрешение также является существенным ограничением. В то время как для практических исследований наибольший интерес представляют проекции на одно-два десятилетия, расчеты на таком коротком временном интервале часто не согласуются как друг с другом, так и с данными наблюдений. Вопрос оптимального пространственного и временного разрешения для использования климатических данных подробно рассматривался в нашей предыдущей работе [8]. Было показано, что для удовлетворительного воспроизведения сезонных трендов температуры, оптимальным решением является осреднение климатических проекций по достаточно большим регионам с одн



**Рис. 9.** Прогнозируемые по оптимальному ансамблю из 8 моделей на период 2035-2064 гг. аномалии среднегодовой и сезонных температур воздуха на территории России (°С).

а – год, б – зима, в – весна, г – лето, д – осень



**Рис. 10.** Прогнозируемые по оптимальному ансамблю из 8 моделей на период 2035-2064 гг. аномалии годовой и сезонных сумм осадков на территории России (мм/мес).  
а – год, б – зима, в – весна, г – лето, д – осень

## **Заключение**

В статье проведен анализ данных о прошлых, современных и ожидаемых в будущем изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков в регионах России, проведено сравнение результатов, получаемых с использованием различных архивов, находящихся в открытом доступе. Важный вывод состоит в том, что лучшие сеточные архивы достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений на метеостанциях на территории России. Сеточные архивы обладают многими преимуществами по сравнению с данными метеостанций, основными являются отсутствие пропусков наблюдений и полный охват любой территории. Еще один важный вывод состоит в том, что оптимально отобранный ансамбль климатических моделей удовлетворительно воспроизводит современные изменения климата в регионах России. Полученные результаты указывают на возможность использования сеточных архивов и оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки современных и ожидаемых в будущем изменений климата и их последствий в регионах России. Полный объем использованных в статье данных и ансамблевые климатические проекции температуры воздуха и осадков для регионов России представлены в веб-приложении.

*Данная работа выполнена в рамках проекта 14-17-00037 Российского Научного Фонда. Анализ климатических моделей CMIP5 проводился при поддержке РФФИ, проект 13-05-00072.*

## **Литература**

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – М. : Планета, 2014. – 58 с.
2. Анисимов, О.А. Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 6. – С. 95-107.
3. Анисимов, О.А. Пространственные и временные закономерности динамики температуры воздуха на территории России в XX – начале XXI века / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, В.А. Кокорев // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. – 2011. – Т. 24. – С. 83-98.
4. Анисимов, О.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу / О.А. Анисимов, В.А. Кокорев // Лед и Снег. – 2013. – Т. 121. – № 1. – С. 83-92.
5. Бедрицкий А.И. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / А.И. Бедрицкий, В.Г. Блинов, Д.А. Гершиноква и др. Т. 1. Изменения климата. – Москва : Росгидромет, 2008
6. Груза, Г.В. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, Л.Н. Аристова и др. // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 10. – С. 5-23.
7. Жильцова, Е.Л. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами / Е.Л. Жильцова, О.А. Анисимов // Метеорология и гидрология. – 2009. – №. 10. – С. 79-90.

8. Кокорев, В.А. Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России / В.А. Кокорев, О.А. Анисимов // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. – 2013. – Т. 25. – С. 131-153.
9. Росгидромет. О деятельности Росгидромета в 2014 году и приоритетных задачах на 2015 год.
10. Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A., et al. Uncertainties in gridded air temperature fields and effects on predictive active layer modeling // *Journal of Geophysical Research*, 2007. – Vol. 112. – Iss. F2 – P. doi:10.1029/2006JF000593.
11. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011. – Vol. 137. – No. 656. – P. 553-597.
12. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // *International Journal of Climatology*, 2014. – Vol. 34. – No. 3. – P. 623-642.
13. Hourdin F., Grandpeix J.-Y., Rio C., et al. LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection // *Climate Dynamics*, 2013. – Vol. 40. – No. 9-10. – P. 2193-2222.
14. Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012. – Vol. 117. – No. D5. – P. doi: 10.1029/2011JD017139
15. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., et al. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002. – Vol. 83. – No. 11. – P. 1631-1643.
16. Knutti R. The end of model democracy? // *Climatic Change*, 2010. – Vol. 102. – Iss. 3-4. – P. 395-404.
17. Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y., et al. An emission pathway for stabilization at 6 Wm<sup>-2</sup> radiative forcing // *Climatic Change*, 2011. – Vol. 109. – No. 1-2. – P. 59-76.
18. Räisänen J., Ylhäisi J.S. How Much Should Climate Model Output Be Smoothed in Space? // *Journal of Climate*, 2010. – Vol. 24. – No. 3. – P. 867-880.
19. Riahi K., Rao S., Krey V., et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // *Climatic Change*, 2011. – Vol. 109. – Iss. 1-2. – P. 33-57.
20. Solomon S., Qin D., Manning M., et al., Eds. (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*. Cambridge, Cambridge University Press.
21. Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J., et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // *Climatic Change*, 2011. – Vol. 109. – Iss. 1-2. – P. 77-94.
22. van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J., et al. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C // *Climatic Change*, 2011. – Vol. 109. – Iss. 1-2. – P. 95-116.