

УДК 551.524.3:551.509.314(470)

**О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России
глобальными климатическими архивами¹**

Е.Л. Жильцова*, О.А.Анисимов*

Рассматриваются четыре климатические архива в узлах регулярной сетки, построенные на основе интерполяции и модельного реанализа данных наблюдений. Оцениваются региональные различия полей температуры воздуха и осадков, проводится сравнение с данными наблюдений на 455 метеостанциях на территории России и сопредельных государств. Отмечается, что глобальные архивы дают смещенные оценки месячных и сезонных осадков, среднегодовой температуры воздуха и сумм температур теплого и холодного периодов. Рассчитаны и построены карты погрешностей климатических характеристик для каждого из архивов, анализируются возможные причины появления больших погрешностей.

Для оценки происходящих климатических изменений и связанных с ними изменений окружающей среды на региональном уровне необходима подробная климатическая информация, прежде всего, по основным метеорологическим характеристикам, таким как приземная температура воздуха и осадки. Недостаточная плотность сети метеостанций, пропуски в наблюдениях, а также сложность получения имеющихся данных приводят к тому, что все большее число исследований основываются на более доступных климатических архивах, в которых первичные наблюдения 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 ее регионов, в значительной степени остаётся открытым.

Показательны результаты, полученные в работе Г.В. Груза с соавторами [2]. В ней, в частности, обсуждалось воспроизведение современного (1961-2000г.) климата

* Государственное учреждение "Государственный гидрологический институт"

¹ Работа поддерживается проектами РФФИ 07-05-00209 и 07-05-13527. Авторы признательны Г.В. Груза за предоставленные данные.

России несколькими лучшими гидродинамическими моделями. Было отмечено, что модели, достаточно хорошо воспроизводя современный тренд приземной температуры воздуха ($0.37^{\circ}\text{C}/10$ лет по моделям и $0.33^{\circ}\text{C}/10$ лет по данным наблюдений), значительно занижают ее величину на всем рассматриваемом периоде. Самое большое смещение было отмечено у японской модели CCSR – более 5°C в целом по России и более 7°C по региону Средней Сибири. В среднем по ансамблю из восьми рассмотренных авторами моделей среднегодовая температура была занижена в регионах на величину от 1.0°C (Северо-восток) до 3.2°C (Средняя Сибирь). Несистематические но весьма значительные отклонения были обнаружены и при сравнении сезонных температур. В зимний период для отдельных моделей они достигали 6.0°C в среднем по России (до 7.5°C для региона Приамурье-Приморье); в летний были чуть меньше, 2.4°C по России и до 4.2°C для Средней Сибири. Сравнение осадков показало, что для всех регионов России за период 1961-2000 практически во всех моделях они больше наблюдаемых. Самые большие различия дает канадская модель – в целом для России почти до 22 мм/месяц и до 31 мм/месяц в районе Байкала. Полученное в моделях повсеместное увеличение осадков согласуется с наблюдениями лишь в западных регионах, поскольку на восточных территориях России (Северо-восток, Средняя Сибирь, Приамурье-Приморье) в этот период отмечалось их уменьшение.

На наш взгляд, эти результаты свидетельствуют прежде всего о том, что глобальные климатические архивы, построенные с использованием модельного реанализа, могут заметно исказить пространственно-временную структуру полей температуры воздуха и осадков на территории России в целом и в отдельных ее регионах. Распространять этот вывод также и на сеточные архивы, полученные интерполяцией данных наблюдений, было бы ошибочно. В настоящее время отсутствуют оценки точности воспроизведения ими климата России и отдельных ее регионов. Она определяется, главным образом, густотой исходной сети метеостанций, интерполяционным алгоритмом и используемой топографической моделью.

В данной работе оценивается качество четырех общедоступных сеточных архивов приземной температуры воздуха и осадков применительно к территории России и сопредельных государств бывшего СССР. Два архива были получены интерполяцией данных наблюдений на метеостанциях (глобальный архив CRU-TS2, <http://www.cru.uea.ac.uk/> и архив для континентов северного полушария <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>), два других - посредством модельного реанализа

(ERA-40 <http://www.ecmwf.int/> и NCEP-1 <http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis>). Существуют несколько версий каждого из этих постоянно пополняемых и продолжаемых архивов, при этом пространственное разрешение сеток в различных версиях составляет от 0.5° до 2.0° . К особенностям архивов можно отнести следующее.

Архив CRU TS 2.1 – разработан и поддерживается в университете Восточной Англии, Великобритания [5]. Он содержит среднемесячные климатические характеристики за период 1901-2002 гг. и охватывает территорию всех континентов земного шара. Данные были получены 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 [6]) с последующим восстановлением абсолютных значений с помощью архива норм за 1961-1990 гг. (архив CRU CL 1.0). Значения температур приведены к высотам узлов сетки, которые заданы топографической моделью, сама модель также входит в сопутствующую документацию.

Архив, созданный в США в университете Делавера К.Виллмотом и К.Мацуро (W&M), содержит месячные значения температуры и осадков за 1930-2004 гг. Архив получен по данным 4517 метеостанций, расположенных на континентах северного полушария. При интерполяции в сетку $0.5 \times 0.5^\circ$ значения температуры на станциях были предварительно приведены к уровню моря, а затем значения в узлах сетки восстановлены для реального рельефа с помощью топографической модели [7], при этом сама модель не приводится.

Архив ERA-40 был получен при помощи модельного реанализа в Европейском центре прогноза погоды. В оригинальном варианте он содержит метеоданные с 6-часовым временным разрешением в узлах сетки N80 (примерно 125×125 км) за период с сентября 1957 по август 2002 г. Был также создан вариант архива с месячным разрешением.

Архив данных реанализа NCEP-1, созданный в США, во многом аналогичен ERA-40. Основное отличие в том, что он использует более грубую сетку T62 (примерно $1.875 \times 1.875^\circ$) и охватывает больший период с 1948 по 2006 гг.

Нами была оценена точность этих архивов и построены карты погрешностей для территории России и сопредельных государств. Для этого климатические характеристики, интерполированные из узлов сетки в местоположение метеостанций, сравнивались с данными наблюдений. В расчетах температура, заданная в узлах сетки,

приводилась к высоте расположения метеостанций по фиксированному адиабатическому градиенту $0.60\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Высоты узлов сеточных архивов CRU и W&M определялись по топографической модели CRU. В архивах ERA-40 и NCEP-1 значения температуры изначально были приведены к уровню моря. Интерполяция проводилась осреднением данных из четырех ближайших к станции узлов с весами, обратно пропорциональными квадрату расстояний до нее. Были также проведены расчеты, в которых не учитывалось различие высот узлов сетки и метеостанций, ниже этот вопрос будет обсужден более подробно. Для сравнения использовались среднемесячные данные измерений приземной температуры воздуха и сумм осадков на 455 метеостанциях с длительными наблюдениями на территории России и сопредельных государств. Сравнение проводилось как для отдельных лет, так и для десятилетий в период 1960-2006 г. Были восстановлены пропуски наблюдений на всех метеостанциях при помощи построения регрессионных зависимостей за отдельные месяцы между рядом в рассматриваемом пункте и рядами в пунктах-аналогах. Описание этого метода и полученных с его помощью результатов восстановления дано в нашей предшествующей публикации [1]. Расчеты проводились с использованием как исходных, так и восстановленных данных, при этом принципиальные отличия в результатах обнаружены не были.

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

- среднегодовая и сезонные температуры,
- годовая амплитуда температуры,
- суммы температур вегетационного и активного периодов (с температурами выше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- дефицит тепла (суммы температур ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- сезонные и годовые суммы осадков.

Ниже приведены выборочные результаты сравнения этих характеристик, рассчитанных по сеточным архивам и по фактическим данным наблюдений осредненные за десятилетие 1971-1980 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.

Важный вывод, касающийся всех исследованных температурных характеристик, состоит в том, что, как ни странно, различия между архивами и наблюдениями в среднем уменьшаются, если при интерполяции сеточных данных в местоположение метеостанций не учитывать различие высот. Этот результат, на первый взгляд необъяснимый, может быть обусловлен двумя причинами. Во-первых, если топографическая модель является неточной, процедура приведения к одинаковой высоте может исказить исходные данные, увеличив тем самым, отличия от наблюдений. Напомним, что из-за отсутствия топографических данных в других архивах нам приходилось во всех случаях пользоваться топографией CRU в узлах сетки 0.5° по широте и долготе. Вторая причина – сложный характер формирования вертикального профиля температуры в ряде регионов России, в особенности в зимний период при наличии инверсий. В этом случае приведение температуры к единой высоте описанным выше способом, очевидно, может увеличить ошибки. Все последующие обсуждаемые в данной статье результаты были получены без учета различий высот при интерполяции сеточных данных. Из-за ограничений объема публикации результаты, полученные с приведением температурных данных к единой высоте, здесь не представлены. Некоторые из них были опубликованы в нашей предшествующей статье [3], где рассматривался несколько иной набор температурных характеристик, существенных для моделирования вечной мерзлоты, и сравнение проводилось лишь для северных территорий России, на которых распространены многолетнемерзлые грунты. Достаточно большие различия сопоставимых результатов, представленных в этих двух публикациях (в обеих приведены карты погрешностей среднегодовой температуры воздуха, см., например, рис. 1 данной статьи), свидетельствуют о том, что необходимы более точные методы учета топографии при анализе температурных данных.

На рисунке 1 показаны разности среднегодовой температуры воздуха, рассчитанной по данным сеточных архивов и по фактическим наблюдениям. Обращает на себя внимание почти инверсионное (по знаку) распределение погрешностей у архивов CRU и W&M на Европейской территории России (ЕТР) и в Западной Сибири (карты на рисунках 1а и 1б). При том, что отличия от наблюдений в этих районах достаточно велики, на многих станциях превышая 2°C , архив CRU преимущественно завышает (положительные разности), а W&M - занижает (отрицательные разности) температуру. На всей восточной части России оба архива дают близкие оценки, которые заметно ниже

данных наблюдений. В целом же стандарт ошибки σ_T по 455 станциям у архива W&M заметно меньше, чем у архива CRU (1.36 и 2.14, соответственно, см. таблицу 1).

Архивы, основанные на модельном реанализе, дают более близкие результаты и удовлетворительно согласуются с наблюдениями на значительной части ЕТР, несколько хуже в Западной Сибири. В восточных районах России оба архива завышают температуру в среднем более чем на 2 °С. При этом ERA-40 обладает меньшим стандартом ошибки, чем NCEP-1 (1.48 и 1.90, соответственно), хотя и уступает по этому показателю архиву W&M. Если принять во внимание, что ERA-40 дает также и наименее смещенную оценку средней по всей территории России температуры воздуха (-0.04 °С), этот архив следует признать наиболее приемлемым для решения задач, связанных с анализом полей среднегодовой температуры и, как будет показана далее, иных температурных характеристик.

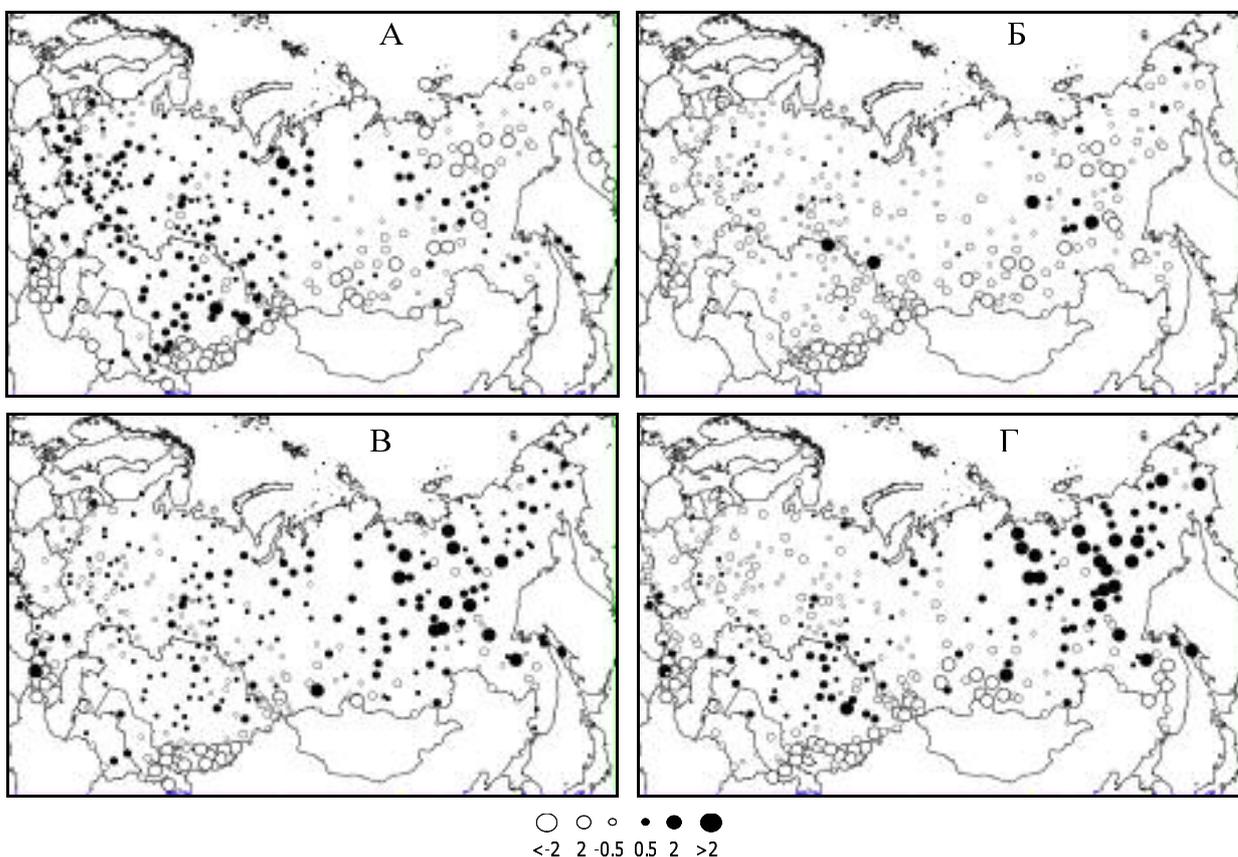


Рис. 1. Разности среднегодовой температуры (°С) за период 1971-1980 гг. между данными сеточных архивов и метеостанций: А – CRU2; Б – W&M; В – ERA-40; Г – NCEP-1

На рисунках 2 и 3 показаны результаты, полученные для суммы вегетационных температур и дефицита тепла. Эти характеристики во многом определяются летней и зимней температурами и по ним можно косвенно судить о воспроизведении архивами

сезонного цикла. У архивов CRU и W&M пространственные распределения погрешностей, соотношения стандарта ошибки и средней величины отклонения суммы вегетационных температур во многом совпадают с закономерностями, выявленными выше при анализе среднегодовой температуры воздуха. В меньшей степени, но все же подобны уже рассмотренным показатели для дефицита тепла. Архив CRU дает наибольший стандарт ошибки этой величины, которая ассоциирована с зимними температурами. Как видно из карты на рисунке 3а, отклонения часто несистематичны и случайно распределены в пространстве, при этом большие по абсолютной величине погрешности разного знака могут встречаться на близлежащих станциях, как это имеет место в Якутии и на Чукотке. Это указывает на фундаментальные проблемы воспроизведения архивом CRU температурного поля в холодный период года. Весьма вероятно, что большие погрешности возникли на этапе формирования архива CRU из-за использования фиксированного температурного градиента, который не соответствует реальному вертикальному профилю, особенно в период зимней инверсии в континентальных районах Сибири и в Якутии.

Архивы ERA-40 и NCEP-1, как и в случае со среднегодовой температурой, дают схожие картины пространственного распределения погрешностей практически на всей территории России. При этом можно отметить некоторые особенности воспроизведения ими температурного режима восточных регионов. Если отклонения среднегодовой температуры от наблюдаемой в них преимущественно положительны (рис. 1в,г), т.е. реанализ ее завышает, то суммы вегетационных температур, напротив, занижены (рис. 2в,г). Очевидно, это обусловлено особенностями поведения моделей, лежащих в основе реанализа, в холодный и теплый периоды года. Вероятно, это модели не способны реалистично воспроизвести достаточно сложный годовой цикл температуры в континентальных областях, где он имеет наибольшую амплитуду. Вполне закономерно выглядят результаты сравнения, представленные на рисунке 3, показывающие, что реанализ завышает значения дефицита тепла в восточных регионах. Поскольку встречаются различные трактовки понятия «дефицит тепла» (в некоторых работах им называют его абсолютную величину), уместно будет пояснить, что в данном случае он рассчитывался как кумулятивная сумма фактических температур за вычетом $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за период, на протяжении которого температура была меньше $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. По такому определению дефицит тепла всегда отрицателен и тем выше (т.е. ближе к 0 в области отрицательных значений), чем выше температура в зимний период.

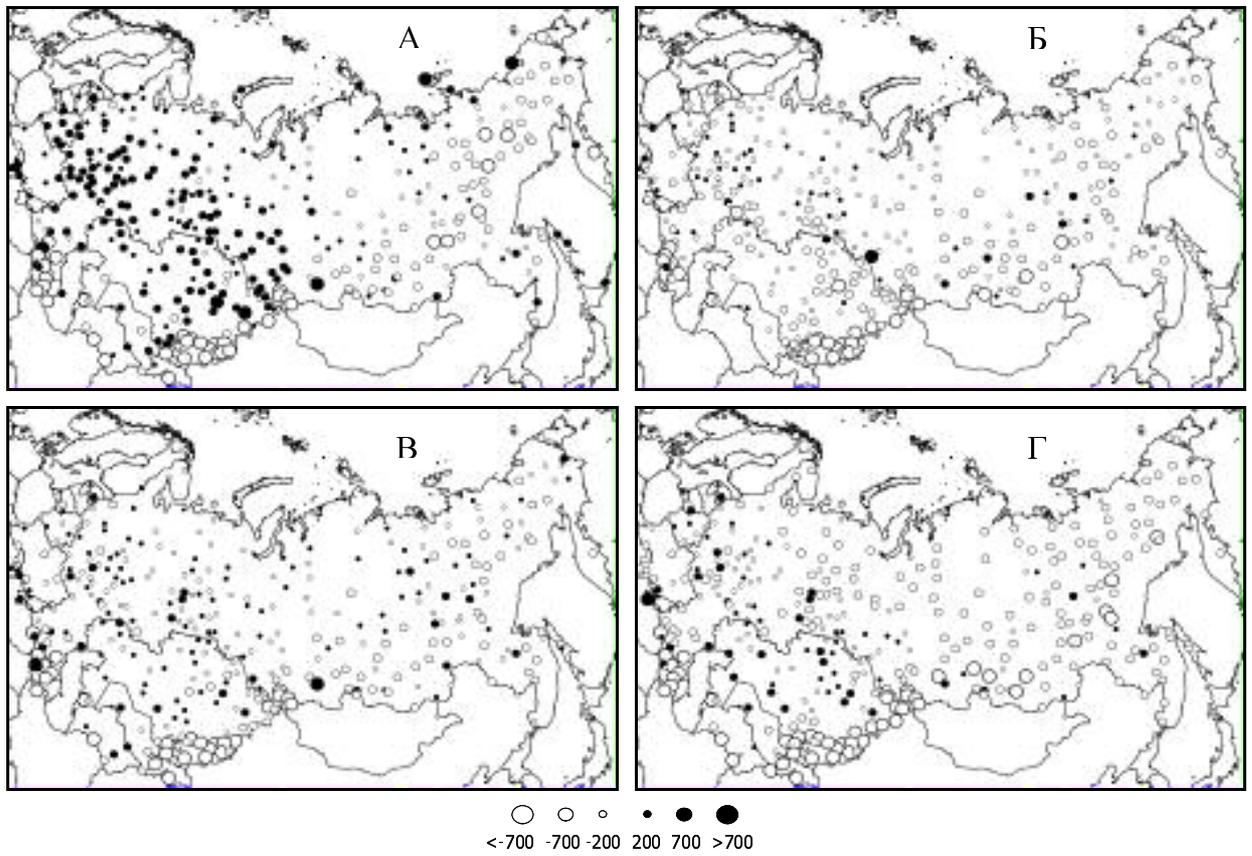


Рис. 2. Разности средних сумм температур вегетационного периода ($>5^{\circ}\text{C}$) за период 1971-1980 гг. между данными сеточных архивов и метеостанций: А – CRU2; Б – W&M; В – ERA-40; Г – NCEP-1

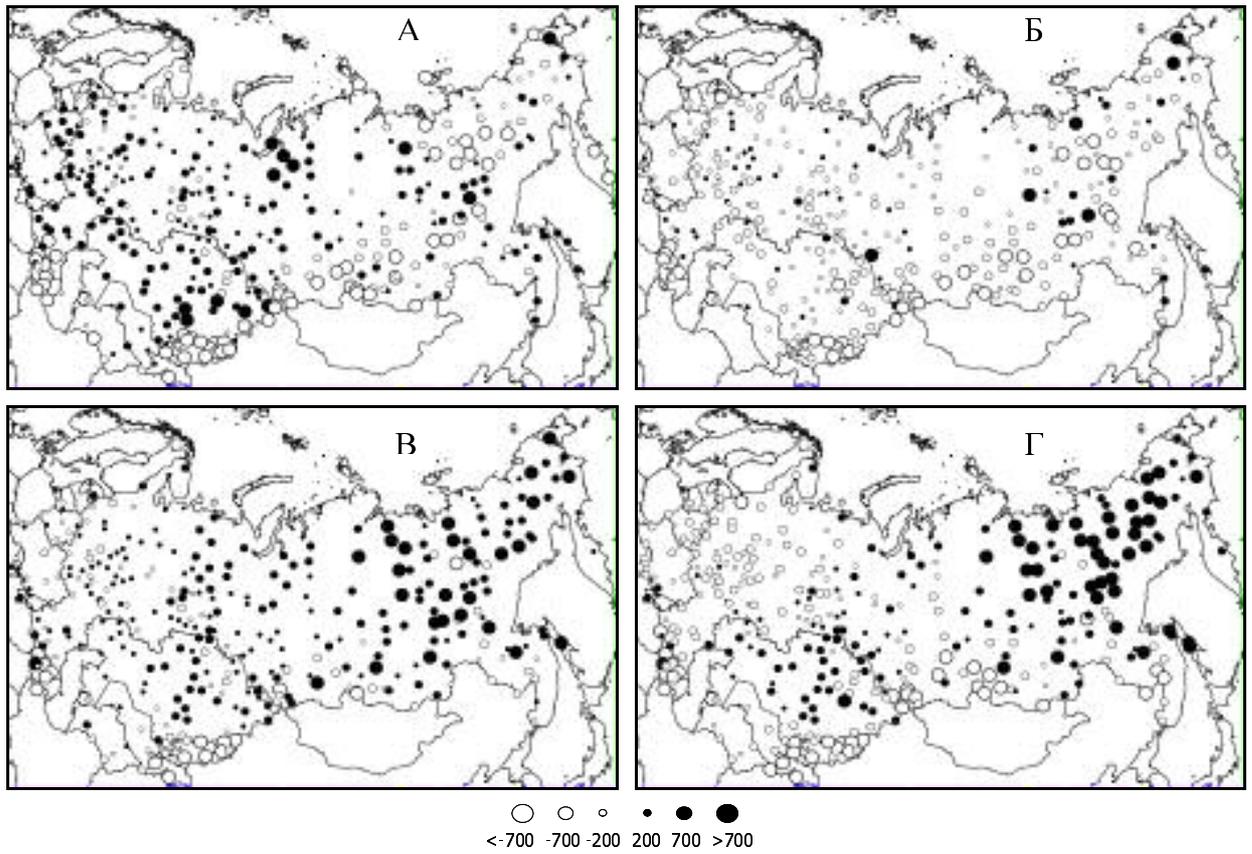


Рис. 3. Разности дефицита тепла ($<8^{\circ}\text{C}</math>) за период 1971-1980 гг. между данными сеточных архивов и метеостанций: А – CRU2; Б – W&M; В – ERA-40; Г – NCEP-1$

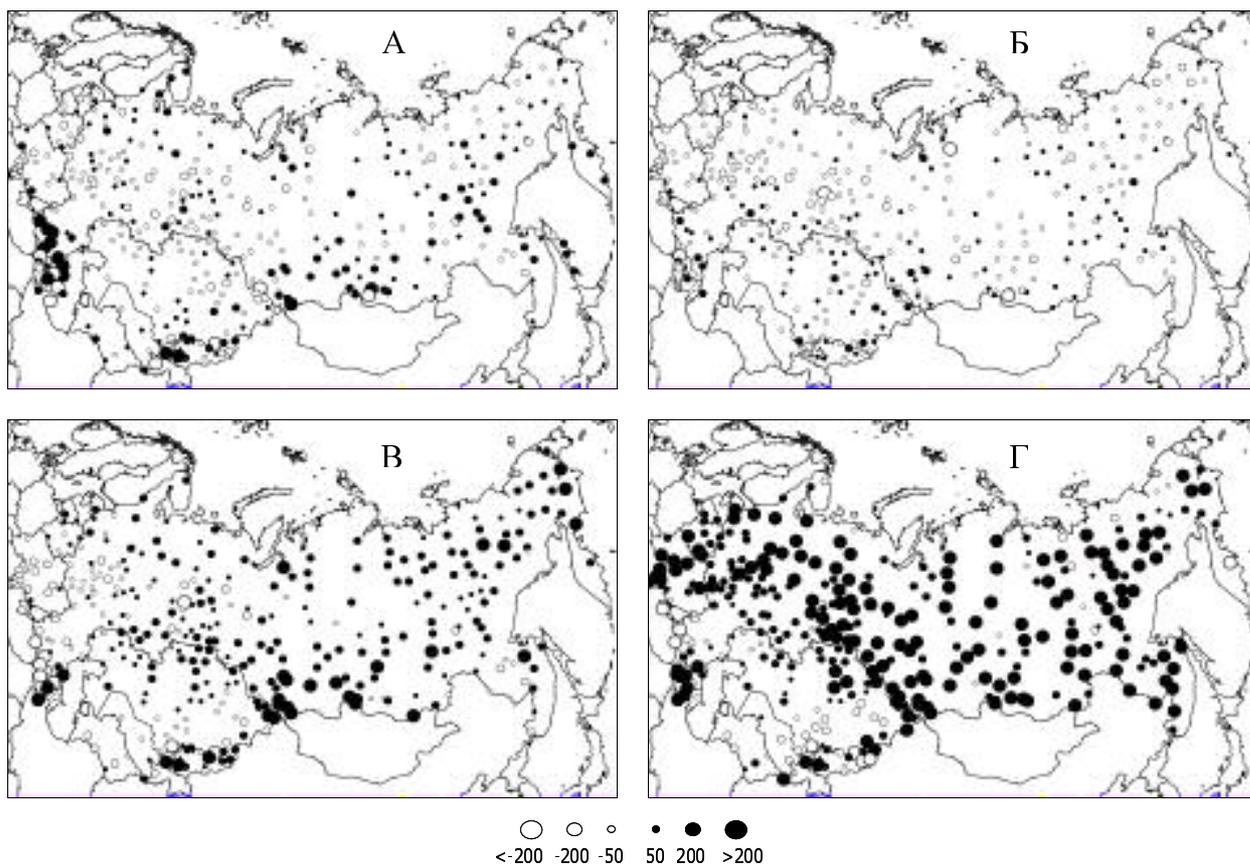


Рис. 4. Разности средних годовых сумм осадков (мм) за период 1971-1980 гг. между данными сеточных архивов и метеостанций: А – CRU2; Б – W&M; В – ERA-40; Г – NCEP-1

Сравнение годовых сумм осадков (рис. 4) показало, что архивы, основанные на реанализе, обладают значительно большей погрешностью, чем данные, получаемые пространственной интерполяцией. Очевидной причиной этого является несовершенство гидродинамических моделей, используемых в реанализе. Погрешность воспроизведения осадков столь велика, что, ранжируя архивы, можно лишь формально отметить несколько лучшие показатели ERA-40 по сравнению с NCEP-1. Оба архива завьшают годовые осадки в целом по России, при этом архив NCEP-1 на весьма значительную величину (188 мм/год). При том, что на большей части рассматриваемой территории годовые нормы осадков находятся в диапазоне 300 – 600 мм, стандарт ошибки этих архивов составляет, соответственно, 151 и 237 мм/год. Показательно, что как среднее смещение, так и стандарт ошибки намного превышают прогнозируемые на середину 21 века изменения осадков. На этом фоне два сеточных архива, полученные интерполяцией

данных наблюдений, обладают вполне приемлемой точностью, хотя и они в некоторых регионах дают значительное смещение (см. рис. 4а,б).

В оценку точности воспроизведения сеточными архивами полей климатических характеристик мы также включили анализ функции распределения погрешности по 455 метеостанциям. Результаты, представленные на рисунке 5, показывают, что распределение ошибок во многих случаях близко к нормальному. Явными исключениями являются асимметричные распределения погрешности осадков обоих реанализов (карты на рис. 4в,г и гистограммы Г3, Г4) и среднегодовой и вегетационной температур для архива CRU (карты на рис. 1а,б и гистограммы А1, А2).

В таблице 1 приведены основные показатели качества воспроизведения полей температурных характеристик и осадков на территории России и сопредельных государств. В ней представлены средние по 455 станциям величины отклонений исследуемых характеристик, рассчитанных по данным четырех сеточных архивов от наблюдений, и стандарт ошибки.

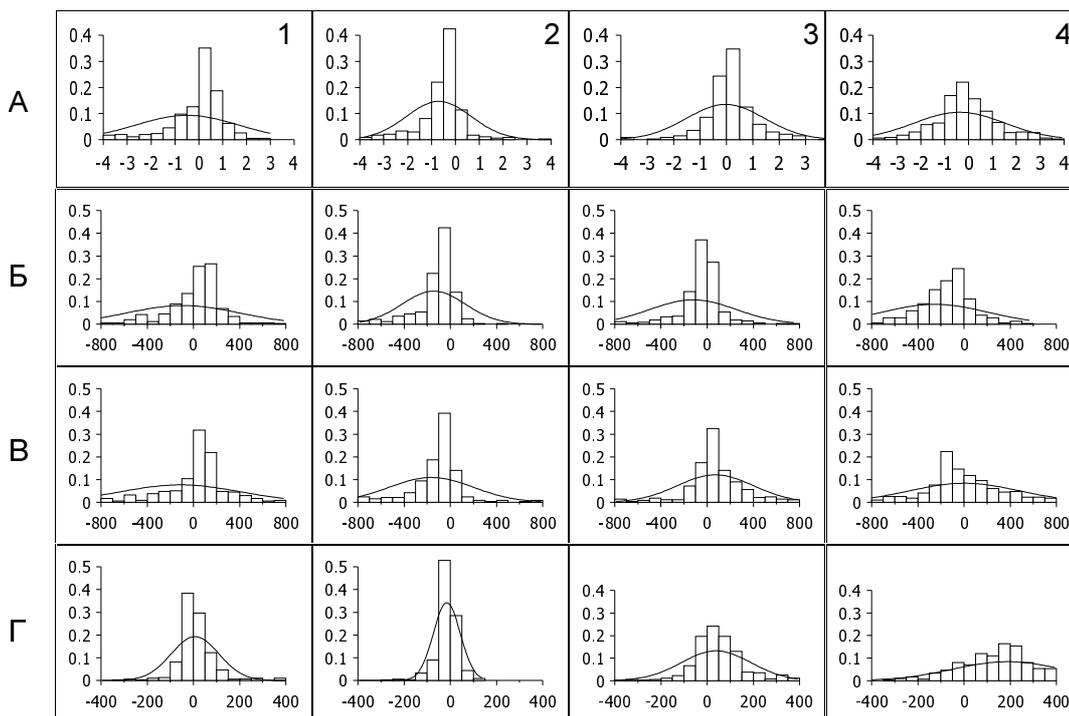


Рис. 5. Гистограммы распределения отклонений: А – среднегодовой температуры; Б – сумм температур вегетационного периода; В – дефицита тепла; Г – годовых сумм осадков за период 1971-80 гг. (1 – CRU2, 2 – W&M, 3 – ERA-40, 4 – NCEP-1).
Огибающие кривые соответствуют нормальному распределению.

Таблица 1. Средние величины отклонений исследуемых характеристик, рассчитанных по данным четырех сеточных архивов от наблюдений и стандарт ошибки.

Архив	$\Delta T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$		$\Delta\Sigma T > 5^\circ\text{C}$		$\Delta\Sigma T < 8^\circ\text{C}$		$\Delta\Sigma Pr, \text{мм/год}$	
	<i>средн.</i>	<i>ст.откл.</i>	<i>средн.</i>	<i>ст.откл.</i>	<i>средн.</i>	<i>ст.откл.</i>	<i>средн.</i>	<i>ст.откл.</i>
CRU2	-0.49	2.14	-90.95	485.81	-111.53	518.09	7	103
WLM	-0.69	1.36	-143.94	274.21	-165.48	364.79	-15	58
ERA-40	-0.04	1.48	-121.90	372.31	70.71	329.55	39	151
NCEP-1	-0.38	1.90	-252.42	456.46	3.67	474.67	188	237

В заключение можно отметить, что выявленные закономерности распределения погрешностей, их знак и величина в целом согласуются с выводами работы [2] о точности воспроизведения климата России гидродинамическими моделями. Сеточные архивы, также как и модели климата, в среднем по России занижают температуру воздуха, что проявляется как в среднегодовой величине, так и в суммах за теплый период. В среднем по России смещение оценок среднегодовой температуры, рассчитанных по сеточным архивам ($0.04 - 0.69 ^\circ\text{C}$), на порядок меньше, чем у гидродинамических моделей ($1.3 - 5.4 ^\circ\text{C}$), при том, что стандарт ошибок приблизительно одинаков. Полученный в [2] вывод о завышении всеми моделями годовых сумм осадков как в среднем по России, так и в каждом из рассмотренных авторами 6 ее крупных регионах, также хорошо согласуется с результатами нашего сравнения для архивов, основанных на реанализе.

Можно провести параллель между данной работой и результатами, полученными в [4]. В этой работе проводилось глобальное и широтное сравнение осадков по шести различным сеточным архивам, в том числе по трем из рассмотренных нами (CRU, W&M и NCEP). Авторы отмечают, что глобальная годовая сумма осадков у NCEP выше, чем в других архивах на $80 - 150 \text{ мм/год}$, в отдельных районах – более чем на 200 мм/год . Ориентируясь на приводимый в работе график широтного распределения осадков, можно сказать, что в среднем для России NCEP завышает их приблизительно на $120 - 150 \text{ мм/год}$, что вполне согласуется с оценками, приведенными в таблице 1. Авторы [4] отмечают практическое совпадение глобальной величины осадков архивов W&M и CRU (697.2 и 697.6 мм/год), в то время как наши результаты указывают на их отличие на 22

мм/год при осреднении по России. Вывод, следующий из этого, состоит в том, что точность этих архивов на территории России заметно меньше, чем в среднем по всему миру.

Судя по полученным нами результатам, не только прогнозы климата обладают низкой достоверностью на территории России (это было показано в [2]), но и современное его состояние в последние несколько десятилетий описывается сеточными архивами с большой неопределенностью и заметно хуже, чем климат многих других регионов мира. Это обусловлено, прежде всего, недостаточностью сети наблюдений в России, и, в меньшей степени, несовершенством алгоритмов, при помощи которых создаются сеточные архивы. Едва ли можно ожидать, что в ближайшие годы ситуация с наличием первичным данным измерений и доступом к ним пользователей кардинально улучшится. Поэтому для многих исследований альтернативы использованию сеточных климатических архивов на территории России пока просто не существует. На картах, представленных на рисунках 1 – 4, выявляются закономерности пространственного распределения погрешностей различных климатических характеристик. Их можно использовать для выбора сеточного архива, обеспечивающего минимальную погрешность при решении конкретных региональных задач.

Список литературы

1. Анисимов, О.А., В.А. Лобанов, и С.А. Ренева. **Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века.**- *Метеорология и гидрология*, 2007, № 10, с. 20-30.
2. Груза, Г.В., Э. Ранькова, Л.Н. Аристова, и Л.К. Клещенко. **О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России.**- *Метеорология и гидрология*, 2006, № 10, с. 5-23.
3. Anisimov, O.A., V.A. Lobanov, S.A. Reneva, N.I. Shiklomanov, and T. Zhang. **Uncertainties in gridded air temperature fields and their effect on predictive active layer modeling.**- *Journal of Geophysical Research*, 2007, № F02S14, p. doi:10.1029/2006JF000593.
4. Fekete, B.M., C.J. Vorosmarty, J.O. Roads, and C.J. Willmott. **Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates.**- *Journal of Climate*, 2004, № 1, p. 294-304.

5. Mitchell, T.D. and P.D. Jones. **An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids.-** *International Journal of Climatology*, 2005, № 6, p. 693-712.
6. New, M., M. Hulme, and P. Jones. **Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology.-** *Journal of Climate*, 1999, № 3, p. 829-856.
7. Willmott, C.J. and S.M. Robeson. **Climatologically Aided Interpolation (Cai) of Terrestrial Air- Temperature.-** *International Journal of Climatology*, 1995, № 2, p. 221-229.