

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ ОСРЕДНЕНИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА КЛИМАТА

Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, Л.К. Клеценко, В.Д. Смирнов*

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, *ggruza@yandex.ru

Реферат. Для избранных регионов России по данным реанализа NCEP/NCAR выполнено сравнение рядов пространственно осредненных аномалий температуры воздуха. Ряды рассчитаны с использованием доступных процедур осреднения в условиях существующей сети стационарных наблюдений и реальной полноты исторических данных. Данные реанализа выбраны как наиболее соответствующие статистической структуре наблюдаемых полей температуры приземного воздуха и не содержащие пропусков. Приводятся оценки неопределенности результатов осреднения в условиях, максимально приближенных к реально доступным данным наблюдений (по освещенности территории, плотности станций и полноте наблюдений).

Ключевые слова. Климат, климатическая норма, аномалия температуры, пространственное осреднение, региональные средние, неопределенность.

ON SPATIAL AVERAGING IN CLIMATE MONITORING PROBLEMS

G.V. Gruza, E.Ya. Rankova, L.K. Kleschenko, V.D. Smirnov*

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, *ggruza@yandex.ru

Abstract. Spatially averaged series of surface air temperature are inter-compared for selected regions of Russia. The series are calculated from NCEP/NCAR reanalysis data with averaging procedures applicable to conditions of existing station network and actual completeness of observational data. Reanalysis outcomes are chosen as the most relevant to statistical structure of the observed surface air temperature fields, with no data missing. Uncertainties of regional means are assessed under conditions similar to real observational data as much as possible (in relation to spatial coverage, density and missing data).

Key words. Climate, climatic norm, temperature anomaly, spatially averaging, regional means, uncertainty.

Введение

Климатические исследования, имеющие большое научное и практическое значение, в качестве одной из важнейших задач включают мониторинг климата. На протяжении двух последних десятилетий регулярный мониторинг климатических изменений на территории Российской Федерации осуществляется ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» (ИГКЭ). Оценки текущих изменений климата в бюллетенях ИГКЭ (<http://climatechange.igce.ru>) представлены как в виде полей точечных (станционных) значений, так и для избранных регионов, по данным пространственно осредненных аномалий температуры воздуха и осадков. В статье (Анисимов, Жильцова, 2012) были подняты вопросы, связанные с неопределенностью региональных оценок изменений температуры воздуха и осадков на территории России, и выполнено сравнение оценок, полученных двумя различными методами пространственного осреднения данных метеостанций. Результаты авторов прокомментированы в (Ранькова, Груза, 2012). В дополнение к сделанному комментарию была проведена серия расчетов, позволившая получить методическое решение ряда вопросов, связанных с пространственным осреднением данных. Описанию основных результатов проведенного эксперимента и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи

Цель описываемого эксперимента – оценить ошибку пространственного (регионального) осреднения аномалий температуры воздуха по данным станционных наблюдений на территории России в условиях существующей сети станций, доступных массивов наблюдений и процедур осреднения. Весь анализ выполнен на данных о среднесуточной температуре воздуха на уровне 2м из обновленного массива реанализов NCEP/NCAR за период 1948-2011 гг. (Kistler et al., 2001). Данные реанализа выбраны как наиболее соответствующие статистической структуре наблюдаемых полей температуры приземного воздуха. С другой стороны, эти данные обеспечивают возможность количественно оценить эффект использования различных процедур

пространственного (по площади регионов) осреднения в условиях, максимально приближенных к реально доступным данным наблюдений (по освещенности территории, плотности станций и полноте наблюдений).

Логика анализа состоит в следующем. Сначала выполняется сравнение обсуждаемых методик пространственного осреднения («моделей») в применении к собственно данным реанализа, т.е. к данным, равномерно и достаточно плотно размещенным на территории регионов, не содержащим пропусков и серьезных выбросов (Задача 1). Представляется, что «межмодельные» различия региональных средних в этом случае можно полностью отнести за счет различия самих моделей (методов осреднения).

Далее необходимо перейти от сеточных данных к данным в точках расположения станций, что, естественно, вносит некоторую неопределенность в используемые данные, зависящую от метода интерполяции. Поэтому следующая задача – сравнить результаты осреднения для разных методов интерполяции, но при прочих равных условиях (Задача 2).

Можно предположить, что эффект перехода от сеточных данных к неравноточным наблюдениям (каковыми и являются реально доступные станционные данные) существенно зависит от плотности и конфигурации используемой сети станций, которые определяют степень освещенности территории данными наблюдений и, как результат, репрезентативность региональных оценок. Эффективность доступных сетей станций в сочетании с методом пространственного осреднения исследуется в Задаче 3.

Наконец, постоянным дополнительным источником неопределенности региональных оценок при практическом мониторинге (и особенно при анализе долгопериодных тенденций в изменении климата!) являются пропуски наблюдений, как в данных за прошлые годы, так и в текущих оперативных данных, поступающих с каналов связи иногда с существенной задержкой. Эффект реальных пропусков наблюдений в базовых массивах данных, используемых в ИГКЭ в технологии мониторинга климата, исследуется в Задаче 4, где приводятся заключительные оценки неопределенности результатов осреднения в условиях реально доступных наблюдений и методов осреднения.

Исходные данные и методика исследования

Массив реанализов содержит данные о глобальных полях температуры воздуха в узлах гауссовой сетки 92×194 (шаг $1,875^\circ$ долготы) суточного разрешения. Для проведения расчетов были получены поля среднемесячной температуры, из которых извлечены данные внутри квадранта $[33,4-88,5^\circ \text{ с.ш.}; 15-195^\circ \text{ в.д.}]$, покрывающего территорию РФ (2910 узлов сетки). Полученная таким образом «вырезка» T_{2910} использовалась в настоящем эксперименте в качестве базового массива.

В соответствии с задачей, месячные данные T_{2910} в каждом узле сетки были преобразованы в аномалии vT_{2910} (отклонения от средних за 1961-1990 гг.) и затем интерполированы в точки расположения станций. Так были получены массивы «станционных» аномалий среднемесячной температуры для трех сетей станций ($s455$, $s674$ и $s926$) и трех методов интерполяции (bi – билинейная, sp – сплайновая и st – сплайновая с предварительной триангуляцией). Обозначим их как vT_{NNN_ii} , где NNN указывает размерность используемой сети (455, 674 или 926), а ii – вариант интерполяции (bi , sp , st). Для определенности отметим, что сеть станций $s455$ соответствует массивам станционных наблюдений в базе данных ИГКЭ, используемым для мониторинга климата России, а варианты сетей $s674$ и $s926$ отражают ближайшую перспективу их расширения на основе данных, размещенных на портале ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru>). Более подробно о сетях станций и методах интерполяции см. ниже.

Для сети $s455$ дополнительно получен массив vT_{455_miss} , который по полноте наблюдений в точности соответствует реальному базовому массиву T_{455} в базе данных ИГКЭ (станционные данные о среднемесячной температуре приземного воздуха для мониторинга климата России). Для этого пропуски наблюдений в массиве T_{455} были «спроецированы» на массив vT_{455_bi} , т.е. для всех позиций «год-месяц-станция» с отсутствием реальных наблюдений в T_{455} значения в vT_{455_bi} заменялись константой отсутствия (*missing value*).

Каждый массив включает 768 полей (64 года по 12 месяцев). Результаты приводятся ниже для января, июля и для года в целом (последние получены по среднегодовым аномалиям). Ниже описываются более детально все факторы, влияющие на результаты усреднения и исследуемые в настоящей работе.

Регионы осреднения. Для анализа выбраны три региона: вся территория РФ, европейская часть России и Западная Сибирь. В бюллетене мониторинга климата ИГКЭ их границы задаются координатами вершин огибающих ломаных линий. Понятно, что осреднение по площади регионов с «криволинейными» границами требует решения ряда дополнительных задач (выделение «внутренних» точек региона и расчет их вклада в результирующее среднее), усложняющих оценку точности собственно процедур осреднения. Поэтому на данном этапе предпринятого анализа регионы были введены в форме широтно-долготных прямоугольников в широтном поясе 55-66° с.ш., примерно соответствующих (по долготной протяженности) названным выше регионам (рис. 1), а именно: zRF – [30-140° в.д.], $zERF$ – [30-60° в.д.], $zWSi$ – [60-90° в.д.]. Названия регионов условные, введены для удобства описания результатов. Представляется, что такие «прямоугольные» регионы в большей мере соответствуют решению методических вопросов, связанных с пространственным осреднением стационарных данных (влияние плотности сети станций, их размещения на территории РФ, наличия пропусков в рядах наблюдений и др.), включая сравнение существующих алгоритмов осреднения.

Сети станций. В оперативно действующей в ИГКЭ системе мониторинга климата России используется сеть 455 станций на территории бывшего СССР s_{455} (российских станций 310). В середине 1980-х, к моменту создания массива, это были практически все доступные гидрометеорологические станции СССР, передающие по каналам связи телеграммы КЛИМАТ (кодовая форма FM 71-XII CLIMAT), для которых удалось собрать документированные данные инструментальных наблюдений за температурой воздуха и осадками, начиная, по крайней мере, с 1951 года.

В настоящее время на сервере ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru/data>) размещены исторические данные о среднемесячной температуре приземного воздуха на 518 станциях России (за период инструментальных наблюдений). Соединив два списка станций s_{455} и s_{518} и исключив из них станции, непригодные к исследованию изменений климата (закрытые станции и станции с длительными пропусками наблюдений, особенно в течение 1990-2000 гг.), получаем сеть 674 станций – s_{674} . Общее число российских станций, данные которых, по существующим оценкам, могут быть

подготовлены во ВНИИГМИ-МЦД в ближайшем будущем, составляет 926 (сеть $s926$). Однако среди них есть как длиннорядные станции (наблюдения с середины XIX столетия), так и открытые позже 1980 года. Географическое положение станций $s455$ и $s674$ показано на рис. 1.

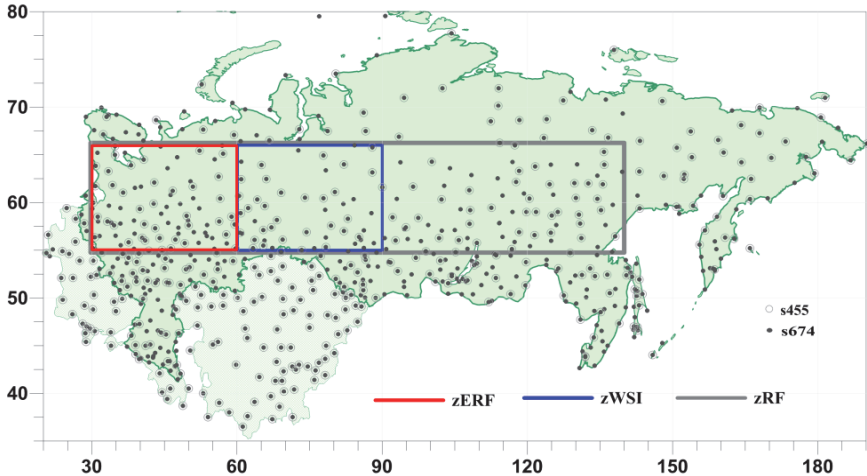


Рис. 1. Сети станций $s455$ и $s674$ и регионы осреднения: zRF [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]; $zERF$ [55-66° с.ш., 30-60° в.д.]; $zWSi$ [55-66° с.ш., 60-90° в.д.]

Количество станций, по которым проводилось пространственное осреднение в каждом из трех рассматриваемых регионов с использованием сетей $s455$, $s674$, $s926$ составляет соответственно: zRF {127, 214, 301}; $zERF$ {44, 82, 114}; $zWSi$ {36, 53, 76}.

Методы интерполяции. В данной работе сравниваются три метода интерполяции: билинейная (bi) и сплайн-интерполяция (sp , st).

Билинейная интерполяция основана на 2-ступенчатой линейной интерполяции (вдоль широтного круга и вдоль меридиана) с использованием четырех ближайших узлов сетки; в вырожденных случаях, когда искомая точка попадает на линии сетки (параллель и/или меридиан), используются два или даже один узел сетки.

Сплайн-интерполяция реализована в данном эксперименте средствами пакета NCAR Graphics (Cline, 1984), с использованием комплексов процедур Fitgrid и Csggrid. С помощью первого

выполнена кубическая интерполяция (*sp*), второго – кубический сплайн (*st*) с предварительной триангуляцией Делоне на сфере (Renka, 1997a,b).

Методы пространственного осреднения. Рассматриваются три методики, обозначенные здесь как *Grads*, *Box* и *Ties*.

Grads – процедура AAVE в системе GRADS (Doty, Kinter, 1992, 1993), реализующая взвешенное осреднение сеточных данных внутри широтно-долготного прямоугольника (вес пропорционален длине широтного круга).

Box – методика двухступенчатого осреднения произвольно размещенных точечных данных, реализованная в технологии мониторинга климата в ИГКЭ. На первом этапе данные приводятся к широтно-долготной сетке путем осреднения точечных значений внутри каждой ячейки сетки («бокса»), а на втором – выполняется осреднение ячейечных средних с учетом площади пересечения ячейки с территорией региона. Аналогичный подход используется в ведущих метеорологических центрах мира при расчете временных рядов глобальной температуры (Peterson, Vose 1997; Brohan et al., 2006; Smith et al., 2008, Hansen et al., 2010). В настоящей работе рассматриваются две реализации данной методики, различающиеся характером вводимой широтно-долготной сетки: *Box1* (программа *eRegion*) – сетка регулярная, с разрешением $2,5^{\circ} \times 5,0^{\circ}$ (равнопромежуточные боксы); и *Box2* (программа *BoxAver*) – сетка «равноплощадных» боксов, площадь которых равна площади ячейки $2,5 \times 2,5$ градуса на экваторе.

Thies – методика осреднения с использованием полигонов Тиссена (Thiessen), реализованная в ФГБУ «Государственный гидрологический институт» Росгидромета на основе ГИС IDRISI-32 (Clark Labs, 2008). Временные ряды региональных средних с использованием методики Thies получены непосредственно авторами этой методики (ФГБУ ГГИ, Анисимов О.А.) и любезно предоставлены ими для данного эксперимента.

Для удобства дальнейшего описания введем дополнительные однобуквенные обозначения для каждого из методов: *G* (*Grads*), *R* (*Box1 = eRegion*), *B* (*Box2=BoxAver*), *T* (*Thies*). Для обозначения результатов осреднения используем аббревиатуры вида: $G07_{2910}$. Здесь первая буква указывает метод осреднения (G-R-B-T), следующие две цифры – календарный период (00 – год, 01 – январь, 07 – июль) и далее – вариант использованных данных (нижний

индекс). В этом случае $G07_{2910}$ означает временной ряд июльских аномалий, регионально осредненных по сеточным данным vT_{2910} с помощью процедуры *Grads*. Аналогичный ряд среднегодовых значений будет обозначен как $G00_{2910}$ и т.д. Напомним, что и интерполяция, и пространственное осреднение выполняются по данным о точечных аномалиях.

Оценки. В качестве оценок различий между двумя методами в конкретных вариантах эксперимента (данные, календарные периоды и др.) будем рассматривать многолетние статистические характеристики ряда разностей (*dif*) соответствующих результатов осреднения, а именно:

$e_{dif} = E(dif)$ – среднее значение (здесь E – оператор временного осреднения);

$q_{dif} = \text{sqrt}(E(dif^2))$ – среднее квадратическое различие;

$\sigma_{dif} = \text{sqrt}(q^2 - e^2)$ – стандартное отклонение различий (для оценки доверительного интервала).

Дополнительно рассматриваются статистические характеристики самих рядов региональных средних аномалий температуры (vT), полученных по каждому методу:

σ_{vT} – стандартное отклонение региональных аномалий (°C);

b_{vT} – коэффициент линейного тренда (°C/10 лет);

d_{vT} – доля дисперсии, учтенная трендом (%);

corr – коэффициент корреляции сравниваемых рядов.

Все перечисленные оценки приводятся ниже за период 1948–2011 гг. Сравнимые пары рядов в таблицах, как правило, указаны в заголовках столбцов. При расчете разностей в качестве уменьшаемого всегда выступает ряд, указанный вторым.

Результаты и обсуждение

Сравнение результатов осреднения при использовании непосредственно сеточных данных реанализа vT_{2910}

В данном разделе исследуется вопрос: в какой мере различаются результаты разных методов осреднения в применении непосредственно к сеточным данным реанализа? В качестве сравниваемых методов рассматриваются: *Grads* (G), *Box1* (R) и *Box2* (B). Метод *Thies* в этом случае не рассматривается, т.к. он практически совпадает с методом *Grads* (центры полигонов Тиссена совпадут с узлами сетки реанализа, а форма полигонов в точности совпадет с ячейками сетки).

В соответствии с принятыми обозначениями, для каждого временного среза (год-январь-июль) и каждого региона сравниваются временные ряды G_{2910} , R_{2910} и B_{2910} . В таблице 1 приводятся многолетние статистики этих рядов за 1948-2011 гг., в том числе средние (e), стандартные отклонения (σ), минимумы (min), максимумы (max) и оценки трендов (b , d). В последней строке таблицы приведены обобщенные значения стандартных отклонений (S), рассчитанные для каждого варианта эксперимента по выборке, объединяющей все три сравниваемых ряда. Эти величины можно рассматривать как усредненную (по методам пространственного осреднения) оценку изменчивости региональных средних и, следовательно, как характеристику их неопределенности.

Можно видеть, что во всех вариантах эксперимента статистики рядов для трех методов осреднения практически совпадают – различия между одноименными оценками находятся в пределах сотых долей градуса, а оценки линейных трендов просто одинаковы (с точностью до $0,01$ °C за 10 лет). Для примера, на рис. 2 приведены временные ряды региональных среднегодовых аномалий температуры для всех трех рассматриваемых регионов и трех методов осреднения. Рисунки для январской и июльской температур аналогичны.

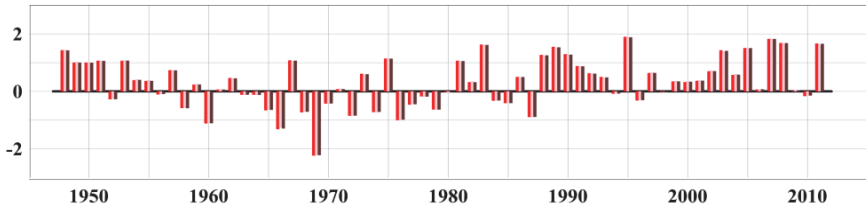
Более детальные результаты попарного сравнения методов пространственного осреднения приведены в таблице 2, которая содержит оценки взаимной корреляции соответствующих временных рядов и статистики их попарных разностей (средние, стандартные отклонения, экстремумы). Пары сравниваемых методов указаны в названиях столбцов. Все приведенные оценки получены за 1948-2011 гг. Как следует из таблицы, межгодовые колебания регионально осредненной температуры всеми тремя методами отображаются синхронно – оценки корреляции рядов во всех случаях близки к единице. «Межмодельные» (между разными методами осреднения) различия оценок региональных среднегодовых температур для всех рассмотренных регионов колеблются в интервале от $-0,06$ до $+0,08$ °C. Аналогичный интервал для января и июля составляет соответственно $[-0,25; +0,34$ °C] и $[-0,14; +0,13$ °C]. Стандартные отклонения попарных «межмодельных» различий практически во всех случаях меньше $0,1$ °C (для среднегодовой температуры – меньше $0,03$ °C) и составляют лишь 2-3% от стандартного отклонения самих региональных средних (см. σ , S в табл. 1).

Статистические характеристики рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным данным за 1948-2011 гг. с использованием методов Grads, Box1 и Box2

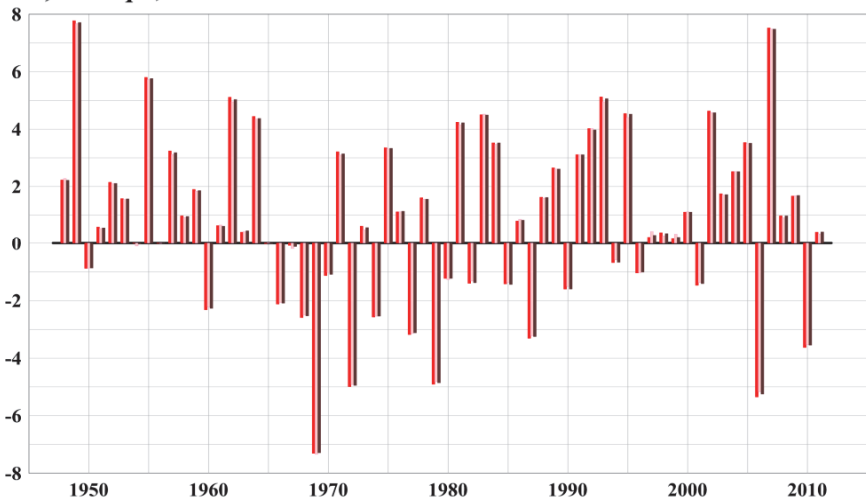
| Оценки | Год | | | Январь | | | Июль | | |
|--|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Grads | Box1 | Box2 | Grads | Box1 | Box2 | Grads | Box1 | Box2 |
| Регион [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,307 | 0,306 | 0,309 | 0,819 | 0,821 | 0,815 | 0,240 | 0,239 | 0,247 |
| <i>σ</i> | 0,859 | 0,865 | 0,852 | 3,034 | 3,065 | 3,014 | 0,716 | 0,719 | 0,712 |
| <i>min</i> | -2,22 | -2,23 | -2,21 | -7,29 | -7,31 | -7,34 | -1,20 | -1,20 | -1,20 |
| <i>max</i> | 1,88 | 1,89 | 1,87 | 7,71 | 7,77 | 7,67 | 1,75 | 1,76 | 1,77 |
| <i>b</i> | 0,12 | 0,12 | 0,12 | -0,03 | -0,03 | -0,02 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| <i>D</i> | 6,6 | 6,5 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,9 | 11,0 | 10,9 |
| <i>S</i> | 0,854 | | | 3,022 | | | 0,712 | | |
| Регион [55-66° с. ш., 30-60° в. д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,269 | 0,267 | 0,272 | 1,072 | 1,067 | 1,084 | 0,266 | 0,269 | 0,261 |
| <i>σ</i> | 0,894 | 0,897 | 0,893 | 3,299 | 3,318 | 3,295 | 1,452 | 1,460 | 1,434 |
| <i>min</i> | -2,14 | -2,14 | -2,14 | -6,62 | -6,62 | -6,63 | -2,79 | -2,79 | -2,78 |
| <i>max</i> | 1,79 | 1,79 | 1,77 | 7,56 | 7,58 | 7,54 | 5,00 | 5,03 | 4,91 |
| <i>b</i> | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,26 | 0,26 | 0,25 |
| <i>D</i> | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 10,8 | 11,0 | 10,6 |
| <i>S</i> | 0,890 | | | 3,287 | | | 1,441 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>E</i> | 0,252 | 0,50 | 0,254 | 0,753 | 0,757 | 0,760 | 0,022 | 0,021 | 0,029 |
| <i>Σ</i> | 1,014 | 1,017 | 1,001 | 3,699 | 3,715 | 3,659 | 1,454 | 1,464 | 1,442 |
| <i>min</i> | -2,32 | -2,33 | -2,31 | -8,62 | -8,63 | -8,54 | -3,74 | -3,76 | -3,73 |
| <i>max</i> | 2,52 | 2,53 | 2,49 | 8,45 | 8,44 | 8,46 | 3,36 | 3,40 | 3,33 |
| <i>B</i> | 0,14 | 0,14 | 0,14 | -0,06 | -0,06 | -0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| <i>D</i> | 6,7 | 6,7 | 6,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| <i>S</i> | 1,005 | | | 3,672 | | | 1,446 | | |

Условные обозначения: *e* – среднее (°C), *σ* – стандартное отклонение (°C), *min*, *max* – экстремумы (°C), *b* – коэффициент линейного тренда (°C/10 лет), *D* – вклад тренда в дисперсию ряда (%), *S* – обобщенное (по методам осреднения) стандартное отклонение (°C).

а) Год, °C



б) Январь, °C



в) Июль, °C

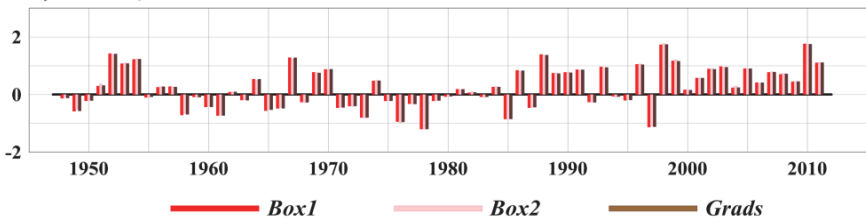


Рис. 2. Временные ряды среднегодовых (а), январских (б) и июльских (с) аномалий температуры воздуха, осредненных по региону zRF [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]. Ряды рассчитаны по сеточным полям реанализа vT2910 за 1948-2011 гг. с использованием трех методов пространственного осреднения (Box1, Box2, Grads – см. легенду). Аномалии рассчитаны относительно средних за период 1961-1990 гг.

Дополнительно отметим, что стандартное отклонение S_{dif} (см. S в табл. 2) можно рассматривать как общую (для рассмотренных методов) оценку неопределенности результатов регионального осреднения для соответствующего региона и календарного периода. Получаем, что 95% доверительный интервал ошибок осреднения ($\pm 1,96 S_{dif}$) в зависимости от региона колеблется в интервале $\pm [0,03-0,04^\circ\text{C}]$ для среднегодовой температуры, $\pm [0,12-0,17^\circ\text{C}]$ для температуры января и $\pm [0,04-0,09^\circ\text{C}]$ для температуры июля. Соответственно, диапазон возможной ошибки осреднения составляет от 0,03 до 0,06 сигмы рассчитываемой величины.

Вывод: при использовании данных, равномерно и достаточно плотно размещенных на территории региона (таковой является сетка реанализа с разрешением менее двух градусов), различия между рассматриваемыми методами осреднения не выходят за пределы точности измерений температуры воздуха. Оценки трендов регионально осредненных аномалий температуры за исследуемый период практически одинаковы для всех трех методов осреднения.

Сравнение результатов осреднения «станционных» данных, полученных с использованием разных методов интерполяции

Задача данного раздела: оценить неопределенность результатов регионального осреднения, вносимую интерполяцией сеточных данных в точки расположения станций. Анализ выполнен на примере метода *Box1* и сети *s455*. Сравниваются временные ряды регионально осредненных аномалий, рассчитанные по четырем массивам данных: vT_{2910} , vT_{455_bi} , vT_{455_sp} и vT_{455_st} . В соответствии с принятыми обозначениями, это ряды R_{2910} , R_{455_bi} , R_{455_sp} , R_{455_st} . Напомним, что первый из них получен по сеточным данным, а три остальных – по данным 455 станций, полученным с помощью трех методов интерполяции.

Как и ранее, анализ выполнен для трех регионов и трех календарных периодов (год, январь, июль) по данным за 1948-2011 гг. Задача предполагает исследование двух вопросов: как влияет на результат осреднения метод интерполяции? и как влияет переход от данных в узлах регулярной сетки к неравномерно размещенным данным в точках сети *s455*?

Статистические характеристики различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным данным за 1948-2011 гг. с использованием методов Grads, Box1 и Box2

| Оценки | Год | | | Январь | | | Июль | | |
|---|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| | (Grads, Box1) | (Grads, Box2) | (Box1, Box2) | (Grads, Box1) | (Grads, Box2) | (Box1, Box2) | (Grads, Box1) | (Grads, Box2) | (Box1, Box2) |
| Регион [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | -0,004 | -0,006 | -0,001 | 0,006 | 0,008 |
| <i>σ</i> | 0,009 | 0,015 | 0,021 | 0,041 | 0,053 | 0,082 | 0,012 | 0,021 | 0,027 |
| <i>min</i> | -0,02 | -0,03 | -0,04 | -0,10 | -0,12 | -0,17 | -0,03 | -0,04 | -0,04 |
| <i>max</i> | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,13 | 0,20 | 0,02 | 0,06 | 0,07 |
| <i>corr</i> | 1,0000 | 0,9999 | 0,9998 | 1,0000 | 0,9999 | 0,9998 | 0,9999 | 0,9996 | 0,9993 |
| <i>S</i> | 0,016 | | | 0,061 | | | 0,021 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 30-60° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | -0,003 | 0,003 | 0,006 | -0,005 | 0,012 | 0,016 | 0,003 | -0,005 | -0,008 |
| <i>σ</i> | 0,010 | 0,018 | 0,024 | 0,039 | 0,070 | 0,095 | 0,019 | 0,035 | 0,048 |
| <i>min</i> | -0,03 | -0,03 | -0,04 | -0,10 | -0,14 | -0,15 | -0,04 | -0,12 | -0,14 |
| <i>max</i> | 0,02 | 0,07 | 0,08 | 0,07 | 0,24 | 0,34 | 0,06 | 0,05 | 0,07 |
| <i>corr</i> | 0,9999 | 0,9998 | 0,9997 | 0,9999 | 0,9998 | 0,9996 | 0,9999 | 0,9998 | 0,9996 |
| <i>S</i> | 0,018 | | | 0,072 | | | 0,036 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | -0,002 | 0,002 | 0,004 | 0,003 | 0,007 | 0,003 | 0,000 | 0,007 | 0,008 |
| <i>σ</i> | 0,012 | 0,024 | 0,029 | 0,049 | 0,086 | 0,115 | 0,29 | 0,047 | 0,050 |
| <i>min</i> | -0,03 | -0,04 | -0,06 | -0,15 | -0,18 | -0,25 | -0,07 | -0,07 | -0,13 |
| <i>max</i> | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,12 | 0,31 | 0,32 | 0,07 | 0,13 | 0,12 |
| <i>corr</i> | 0,9999 | 0,9998 | 0,9997 | 0,9999 | 0,9998 | 0,9996 | 0,9998 | 0,9995 | 0,9995 |
| <i>S</i> | 0,023 | | | 0,087 | | | 0,043 | | |

Условные обозначения: *e*, *σ*, *min*, *max*, *S* – см. табл. 1, но для попарных разностей рядов; *corr* – коэффициент корреляции рядов.

На первый вопрос отвечают данные таблицы 3, на второй – данные таблицы 4. Оценки приведены в терминах ранее описанных статистических характеристик *e*, *σ*, *min*, *max*, *corr*, *S*.

Результаты попарного сравнения региональных рядов R_{455_bi} , R_{455_sp} , R_{455_st} , отличающихся лишь методом интерполяции (табл. 3), показали, что для всех сезонов и регионов различия между региональными средними, рассчитанными по разным массивам интерполированных данных, остаются внутри диапазона от $-0,04$ до $+0,07^{\circ}\text{C}$. Смещение оценок отсутствует, ряды идеально коррелированы, а стандартное отклонение исследуемых различий лишь в отдельных вариантах достигает $0,02^{\circ}\text{C}$. Таким образом, различия региональных средних не выходят за пределы точности измерений и выбор метода интерполяции (из трех рассмотренных) при переходе от сеточных данных к «станционным» практически не влияет на результаты осреднения. В дальнейшем анализе предпочтение отдано билинейной интерполяции как более простой и очевидной. Сами ряды различий аномалий январской и июльской температуры приведены на рис. 3 для европейского и западно-сибирского регионов.

В таблице 4 анализируются различия между рядами регионально осредненных аномалий температуры R_{2910} и R_{455_bi} (осреднение методом *Box1* по данным в регулярной сетке и по данным в точках размещения 455 метеостанций). Можно видеть, что среднее значение разностей сравниваемых рядов во всех вариантах составляет менее $0,03^{\circ}\text{C}$, а стандартное отклонение меняется в зависимости от сезона и составляет $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$ для января и $0,07-0,11^{\circ}\text{C}$ для июля. Для среднегодовых аномалий температуры эта величина существенно ниже ($0,04-0,06^{\circ}\text{C}$). Во всех случаях диапазон ошибок при использовании «станционных» данных выше, чем при осреднении значений в узлах регулярной сетки. Коэффициенты корреляции сравниваемых рядов во всех случаях равны 1.

Вывод: переход от регулярной сетки реанализа (разрешение менее 2°) к данным в точках расположения 455 станций (сеть климатического мониторинга) значительно увеличивает ошибку осреднения, но не влияет на оценки региональных трендов. Диапазон ошибок осреднения практически не зависит от метода интерполяции, но существенно зависит от календарного периода. Межгодовые колебания регионально осредненных рядов R_{455_bi} , как и оценки линейных трендов, хорошо согласуются с соответствующими результатами, полученными по полной сетке данных R_{2910} .

Таблица 3

Оценки различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по интерполированным данным R_{455_bi} , R_{455_sp} , R_{455_st} за 1948-2011 гг. Метод осреднения: Vox1. Методы интерполяции: bi, sp, st.

| Оценки | Год | | | Январь | | | Июль | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | (bi, sp) | (bi, st) | (sp, st) | (bi, sp) | (bi, st) | (sp, st) | (bi, sp) | (bi, st) | (sp, st) |
| Регион [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| <i>σ</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| <i>min</i> | -0,01 | -0,01 | 0,00 | -0,03 | -0,04 | -0,01 | -0,01 | -0,01 | -0,01 |
| <i>max</i> | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,03 |
| <i>corr</i> | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| <i>S</i> | 0,00 | | | 0,01 | | | 0,01 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 30-60° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| <i>σ</i> | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| <i>min</i> | -0,01 | -0,01 | -0,01 | -0,04 | -0,05 | -0,03 | -0,03 | -0,02 | -0,02 |
| <i>max</i> | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,07 |
| <i>corr</i> | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| <i>S</i> | 0,00 | | | 0,02 | | | 0,02 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| <i>σ</i> | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| <i>min</i> | -0,01 | -0,01 | -0,01 | -0,05 | -0,05 | -0,01 | -0,03 | -0,03 | -0,02 |
| <i>max</i> | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,01 |
| <i>corr</i> | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| <i>S</i> | 0,01 | | | 0,02 | | | 0,01 | | |

Условные обозначения см. в табл. №2.

**Оценки различия рядов региональных аномалий температуры,
рассчитанных по сеточным данным реанализа R_{2910} и по
интерполированным данным R_{455_bi} за 1948-2011 гг.
Метод осреднения Vox1.**

| Оценки | [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | [55-66° с.ш., 30-60° в.д.] | | | [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | |
|-------------|-----------------------------|--------|-------|----------------------------|--------|-------|----------------------------|--------|-------|
| | год | январь | июль | год | январь | июль | год | январь | июль |
| <i>e</i> | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | -0,02 | 0,01 |
| <i>σ</i> | 0,04 | 0,12 | 0,07 | 0,05 | 0,17 | 0,09 | 0,06 | 0,22 | 0,11 |
| <i>min</i> | -0,09 | -0,25 | -0,13 | -0,09 | -0,39 | -0,18 | -0,14 | -0,44 | -0,28 |
| <i>max</i> | 0,08 | 0,28 | 0,21 | 0,12 | 0,50 | 0,20 | 0,09 | 0,59 | 0,26 |
| <i>corr</i> | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Условные обозначения см. в таблице 2.

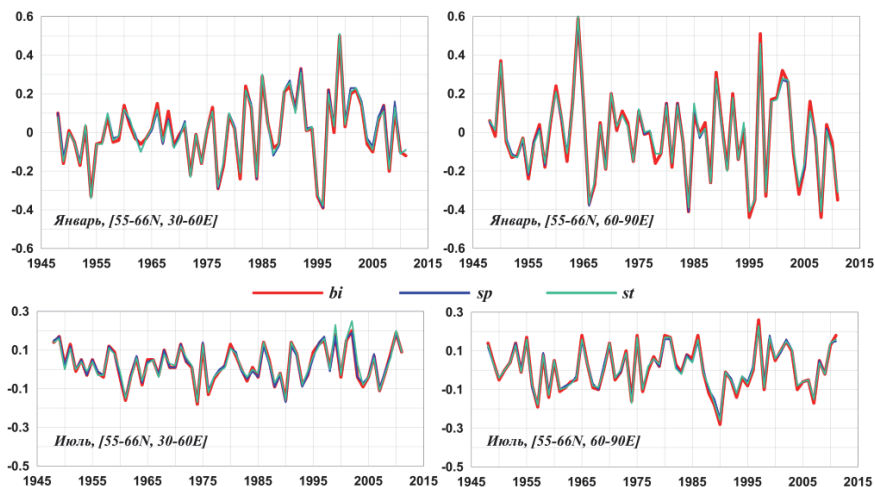


Рис. 3. Временные ряды различий между средними региональными аномалиями температуры воздуха в январе (вверху) и июле (внизу), рассчитанными по сеточным полям реанализа vT_{2910} и интерполированным данным vT_{455} для европейского (слева) и западносибирского (справа) регионов за 1948-2011 гг. Метод пространственного осреднения: Vox1. Методы интерполяции: *bi* – билинейная, *sp* – кубический сплайн, *st* – кубический сплайн с триангуляцией

Сравнение результатов осреднения «станционных» данных для сетей станций разной плотности

В данном разделе сравниваются (при прочих равных условиях) региональные средние, полученные по исходным сеточным полям реанализа и по данным реанализа, интерполированным в точки расположения станций s_{455} , s_{674} , s_{926} . Цель такого сравнения – оценить влияние плотности размещения точечных данных на результаты осреднения. К сожалению, в данном случае расширение сети станций никак не связано с равномерным увеличением ее плотности, а всего лишь отражает исторически сложившуюся ситуацию с доступными данными наблюдений на территории России.

Учитывая предыдущие выводы, «прочие равные условия» представлены здесь билинейным методом интерполяции (bi) и принятым в мониторинге методом регионального осреднения ($Box1$). В результате, временные ряды региональных средних R_{455_bi} , R_{674_bi} и R_{926_bi} сравниваются с рядом R_{2910} (табл. 5) и между собой (табл. 6). В таблицах соответствующие варианты сетей обозначены как s_{455} , s_{674} , s_{926} и s_0 . Данные столбца (s_0 , s_{455}) повторяют оценки табл. 4 и приведены здесь для удобства сопоставления. Результаты сравнения приведены (аналогично табл. 3) в терминах статистик e , σ , min , max , $corr$, S для трех календарных периодов (год, январь, июль) и трех регионов. В таблице 5 дополнительно приведен коэффициент линейного тренда рядов попарных разностей (b , °C/10 лет), который равен разности коэффициентов трендов самих сравниваемых рядов.

В таблице 6 представлены обобщенные оценки, рассчитанные по объединенной выборке для всех трех пар сетей. Таким образом, разности в табл. 5 означают «ошибку» осреднения за счет перехода от исходных сеточных данных к данным в точках расположения станций конкретной сети (чем меньше σ , тем лучше сеть описывает поле на территории региона). С другой стороны, оценка S_{dif} в таблице 6 характеризует усредненную ошибку при использовании любой из трех рассматриваемых сетей вместо исходного сеточного поля реанализа (чем меньше S_{dif} , тем меньше результат осреднения зависит от выбора сети).

Для иллюстрации эффекта каждой из сетей на рис. 4 для трех регионов показаны временные ряды соответствующих различий между пространственно осредненными среднегодовыми аномалиями

температуры. Как видно из этого рисунка и подтверждается оценками таблицы 5, расширение сети от s_{455} до s_{674} заметно улучшает результаты осреднения: уменьшается стандартное отклонение рядов разностей (s) и сужается диапазон их изменения [min , max]. Однако дальнейшее расширение сети до s_{926} в целом для рассматриваемого широтного пояса и для западносибирского региона оказывается менее эффективным.

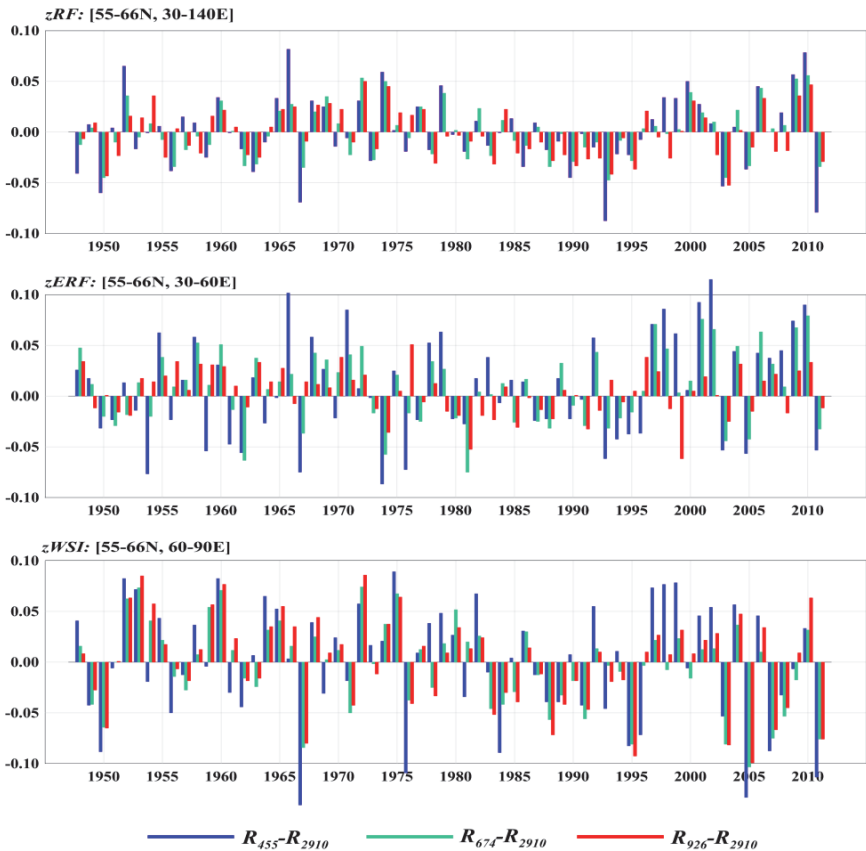


Рис. 4. Временные ряды различий между средними годовыми региональными аномалиями температуры воздуха, рассчитанными по сеточным полям реанализа vT_{2910} и по интерполированным данным в точках расположения станций s_{455} , s_{674} , s_{926} . Метод интерполяции: билинейная. Метод пространственного осреднения: Vox1.

Таблица 5

Оценки различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по полным полям реанализа и по интерполированным данным в точках s455, s674 и s926. Метод интерполяции: bi. Метод усреднения: Vox1. Период оценивания: 1948-2011 гг.

| Оценки | Год | | | Январь | | | Июль | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | (s ₀ , s ₄₅₅) | (s ₀ , s ₆₇₄) | (s ₀ , s ₉₂₆) | (s ₀ , s ₄₅₅) | (s ₀ , s ₆₇₄) | (s ₀ , s ₉₂₆) | (s ₀ , s ₄₅₅) | (s ₀ , s ₆₇₄) | (s ₀ , s ₉₂₆) |
| Регион [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 |
| <i>σ</i> | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,12 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,04 | 0,05 |
| <i>min</i> | -0,09 | -0,05 | -0,05 | -0,25 | -0,17 | -0,16 | -0,13 | -0,09 | -0,09 |
| <i>max</i> | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,28 | 0,22 | 0,31 | 0,21 | 0,10 | 0,08 |
| <i>corr</i> | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 0,995 | 0,998 | 0,998 |
| <i>b</i> | 0,001 | 0,002 | -0,002 | 0,009 | 0,010 | 0,012 | 0,008 | 0,004 | -0,001 |
| <i>S</i> | 0,03 | | | 0,10 | | | 0,06 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 30-60° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | -0,01 |
| <i>σ</i> | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,17 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | 0,06 | 0,04 |
| <i>min</i> | -0,09 | -0,08 | -0,06 | -0,39 | -0,33 | -0,23 | -0,18 | -0,11 | -0,13 |
| <i>max</i> | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 0,50 | 0,37 | 0,24 | 0,20 | 0,13 | 0,06 |
| <i>corr</i> | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 0,998 | 0,999 | 1,000 |
| <i>b</i> | 0,006 | 0,002 | -0,002 | 0,016 | 0,009 | -0,004 | 0,002 | -0,001 | -0,009 |
| <i>S</i> | 0,04 | | | 0,14 | | | 0,07 | | |
| Регион [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,02 | -0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| <i>σ</i> | 0,06 | 0,04 | 0,05 | 0,22 | 0,17 | 0,18 | 0,11 | 0,10 | 0,10 |
| <i>min</i> | -0,14 | -0,10 | -0,10 | -0,44 | -0,32 | -0,31 | -0,28 | -0,19 | -0,20 |
| <i>max</i> | 0,09 | 0,07 | 0,09 | 0,59 | 0,42 | 0,43 | 0,26 | 0,19 | 0,21 |
| <i>corr</i> | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,999 | 0,998 |
| <i>b</i> | -0,004 | -0,007 | -0,007 | -0,014 | -0,004 | 0,001 | 0,002 | -0,003 | -0,002 |
| <i>S</i> | 0,05 | | | 0,19 | | | 0,10 | | |

Условные обозначения см. в табл. №2; *b* (°C/10 лет) – разность коэффициентов линейного тренда сравниваемых рядов.

Обобщенные оценки различия рядов регионально осредненных аномалий температуры за 1948-2011 гг., в среднем для сетей станций

S₄₅₅, S₆₇₄ и S₉₂₆

| Оценки | [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | [55-66° с.ш., 30-60° в.д.] | | | [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | |
|------------------|-----------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|
| | год | январь | июль | год | январь | июль | год | январь | июль |
| e_{dif} | -0,002 | 0,003 | -0,014 | -0,003 | 0,003 | -0,027 | 0,000 | 0,009 | -0,005 |
| S_{dif} | 0,021 | 0,079 | 0,040 | 0,039 | 0,145 | 0,081 | 0,029 | 0,103 | 0,044 |
| $1,96 * S_{dif}$ | 0,041 | 0,155 | 0,078 | 0,077 | 0,284 | 0,158 | 0,057 | 0,203 | 0,086 |
| S_{VT} | 0,845 | 2,994 | 0,717 | 0,883 | 3,258 | 1,443 | 0,985 | 3,604 | 1,399 |
| S_{dif}/S_{VT} | 0,025 | 0,026 | 0,055 | 0,045 | 0,044 | 0,056 | 0,030 | 0,029 | 0,031 |

Условные обозначения: e_{dif} , S_{dif} – средние и сигма рядов попарных разностей, S_{VT} – сигма самих рядов

В то же время для европейского региона просматривается определенное преимущество сети $s926$ – такая ситуация может указывать на то, что расширение сети $s926$ произошло в большей мере за счет европейских станций. Этот результат согласуется с оценками таблицы 6, согласно которой стандартное отклонение S_{dif} для европейского региона на 30% выше, чем для западносибирского, во все рассмотренные «сезоны» (год, январь, июль).

Визуальное сравнение рядов регионально осредненных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным и интерполированным данным (здесь не приведены) убедительно подтверждает синхронность их межгодовых колебаний, которая отражена коэффициентами корреляции в таблице 5. Достаточно устойчивые оценки линейных трендов в рядах регионально осредненных аномалий температуры обеспечиваются уже при использовании сети $s674$ – ожидаемая ошибка для всех трех регионов и трех календарных периодов ниже $0,01^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$. Но даже при использовании сети $s455$ различия оценок линейного тренда по сеточным и интерполированным данным не превышают $0,016^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$.

Вывод: расширение сети от 455 до 674 станций (в рамках рассматриваемой конфигурации) заметно улучшает результаты осреднения, т.е. уменьшает ожидаемую ошибку, вносимую использованием неравномерно размещенных точечных данных (в точках расположения станций) вместо сеточных данных реанализа (с разрешением менее 2°). Однако дальнейшее расширение сети до 926 станций дает лишь локальный эффект (в европейском регионе). В целом, можно считать, что расширение сети эффективно при условии сопутствующего улучшения освещенности территории региона данными наблюдений. Отметим, что подобный анализ позволяет априори оценить (по данным реанализа) эффективность любой проектируемой конфигурации сети станций для заданной методики осреднения и территории региона. В частности, можно видеть, что даже при использовании сети 926 станций (следовательно, и двух других) освещенность данными в азиатском секторе России (особенно в северных районах) остается определенно недостаточной и заметно ниже, чем на европейской территории России.

Оценка неопределенности результатов осреднения в условиях реально доступных наблюдений и методов осреднения

Следующий результат касается оценки ожидаемой ошибки осреднения в условиях практического мониторинга климата, выполняемого в ИГКЭ в настоящее время. Напомним, что базовый массив мониторинга климата содержит данные о среднемесячной температуре воздуха на 455 станциях территории бывшего СССР, которые, как было показано выше, недостаточно полно и неравномерно освещают территорию РФ, особенно ее азиатскую часть. Серьезным источником дополнительной неопределенности принято считать наличие эпизодических пропусков наблюдений, охватывающих иногда весьма большие территории и нарушающие однородность длиннорядных наблюдений.

С учетом результатов предыдущих сопоставлений, в данном эксперименте проведено сравнение рядов региональных средних, полученных по массиву vT_{455_bi} (данные реанализа, интерполированные в точки сети s_{455} посредством билинейной интерполяции) с использованием трех методов пространственного

осреднения: *Box1*, *Box2* и *Thies*. Метод *Grads* в этом случае не рассматривался, поскольку он не предусматривает взвешенного осреднения неравноточных данных. Для анализа влияния пропусков наблюдений аналогичные комплекты оценок рассчитаны по массиву vT_{455_miss} , который получен из массива vT_{455_bi} исключением значений, соответствующих пропускам данных в реальных наблюдениях (далее массив vT_{455_bi} будем обозначать просто vT_{455}). Сравнение выполнено, как и во всех других экспериментах, для трех регионов и трех календарных периодов.

Результаты сравнения приведены в таблице 7 для одного региона [55-66° с.ш., 30-140° в.д.], но для всех пар рассматриваемых методов (указаны в заголовках столбцов). Для полной картины и удобства анализа в таблице представлены все три варианта входных данных: vT_{2910} – сеточные поля реанализа, vT_{455} – данные на сети 455 станций (билинейная интерполяция) без пропусков наблюдений и vT_{455_miss} – те же данные на сети 455 станций, но с реальной полнотой наблюдений. Оценки для vT_{2910} повторяют таковые из верхней строки таблицы 2. Таким образом, приведенные в таблице 7 результаты позволяют судить о масштабах «межмодельных» (между методами осреднения) различий в зависимости от количества и размещения данных (2910 узлов регулярной сетки или сеть 455 станций), полноты наблюдений и календарного периода.

Временные ряды пространственно осредненных аномалий средней годовой температуры по региону [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] приведены на рисунке 5. Смежными столбиками здесь показаны результаты осреднения тремя сравниваемыми методами *Box1*, *Box2* и *Thies*. Уже из рисунка видно, что «межмодельные» различия (между столбиками) очень малы в сравнении с масштабом изменчивости самих регионально осредненных аномалий. Это наблюдение согласуется с оценками S (табл. 7), которые колеблются в диапазоне 0,019 – 0,025°C для годовой аномалии температуры в регионе zRF (по данным vT_{455}). Для январских температур этот диапазон составил 0,07-0,09°C, для июльских – 0,04-0,06°C. Аналогичные оценки по массиву с пропусками данных vT_{455_miss} несколько выше, но даже в январе они не превышают точности наблюдений 0,1°C.

Оценки различия рядов регионально осредненных аномалий температуры при использовании разных методов пространственного осреднения (Box1, Box2, Thies) и разных наборов входных данных (vT_{2910} , vT_{455} , vT_{455_miss}). Регион осреднения: [55-66° с.ш., 30-140° в.д.].
Период оценивания: 1948-2011 гг.

| Оценки | vT_{2910} | | | vT_{455} | | | vT_{455_miss} | | |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------------|
| | (Box1, Box2) | (Grads, Box1) | (Grads, Box2) | (Box1, Box2) | (Thies, Box1) | (Thies, Box2) | (Box1, Box2) | (Thies, Box1) | (Thies, Box2) |
| Год | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,003 | 0,000 | -0,003 | 0,002 | -0,002 | -0,003 | 0,002 | 0,001 | -0,001 |
| <i>q</i> | 0,021 | 0,009 | 0,015 | 0,022 | 0,019 | 0,025 | 0,021 | 0,028 | 0,028 |
| δ | 0,025 | 0,011 | 0,017 | 0,026 | 0,022 | 0,029 | 0,025 | 0,033 | 0,033 |
| <i>corr</i> | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 |
| <i>b</i> | -0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,003 |
| Январь | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | -0,006 | -0,002 | 0,004 | -0,005 | -0,007 | -0,002 | -0,012 | -0,015 | -0,003 |
| <i>q</i> | 0,083 | 0,041 | 0,053 | 0,087 | 0,074 | 0,089 | 0,083 | 0,104 | 0,099 |
| δ | 0,027 | 0,014 | 0,018 | 0,029 | 0,025 | 0,030 | 0,028 | 0,035 | 0,033 |
| <i>corr</i> | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 |
| <i>b</i> | 0,010 | 0,005 | -0,004 | -0,010 | -0,004 | 0,006 | -0,011 | -0,006 | 0,005 |
| Июль | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,008 | 0,001 | -0,006 | -0,002 | -0,017 | -0,014 | -0,003 | -0,014 | -0,011 |
| <i>q</i> | 0,028 | 0,012 | 0,022 | 0,042 | 0,053 | 0,061 | 0,046 | 0,068 | 0,074 |
| δ | 0,039 | 0,016 | 0,031 | 0,058 | 0,074 | 0,086 | 0,063 | 0,094 | 0,103 |
| <i>corr</i> | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 0,998 | 0,998 | 0,997 | 0,998 | 0,996 | 0,995 |
| <i>b</i> | -0,002 | -0,001 | 0,001 | -0,001 | -0,008 | -0,007 | 0,000 | -0,009 | -0,009 |

Условные обозначения: *e*, *q*, *b* – среднее значение, среднеквадратическое различие и коэффициент линейного тренда «межмодельных» различий; $\delta = q/\sigma_T$ – относительное различие; *corr* – коэффициент корреляции сравниваемых рядов (см. заголовок столбца)

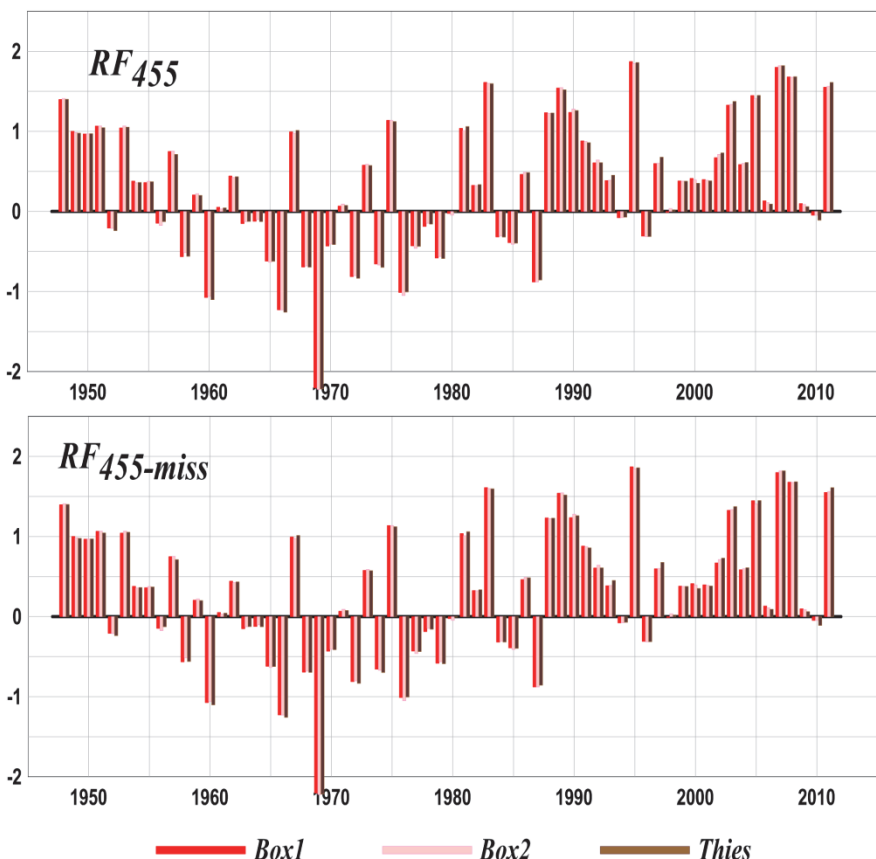


Рис. 5. Временные ряды среднегодовых аномалий температуры воздуха, осредненных по территории региона zRF [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]. Ряды рассчитаны по интерполированным данным vT_{455_bi} (вверху) и vT_{455_miss} (внизу) за 1948-2011 гг. с использованием трех методов пространственного осреднения: *Box1*, *Box2* и *Thies*.

«Межмодельная» корреляция рядов для всех наборов данных и всех сравниваемых методов близка к 1, а различия в оценках линейного тренда практически не выходят за пределы $0,01^{\circ}\text{C}/10$ лет.

На рисунке 6 более детально показаны различия между методами *Thies* и *Box1* для разных регионов и сезонов в двух вариантах расчета: по полным данным vT_{455} и по данным с реальными пропусками наблюдений vT_{455_miss} . Хорошо видно, что с

середины 1990-х годов при наличии пропусков данных в исходном массиве различия увеличиваются и, соответственно, точность оценок региональных средних уменьшается. Отсутствие данных наблюдений в этот период вследствие закрытия метеорологических станций составляет в регионах до 22%. Этот фактор особенно четко проявляется в оценках для региона $zWSi$ (Западная Сибирь).

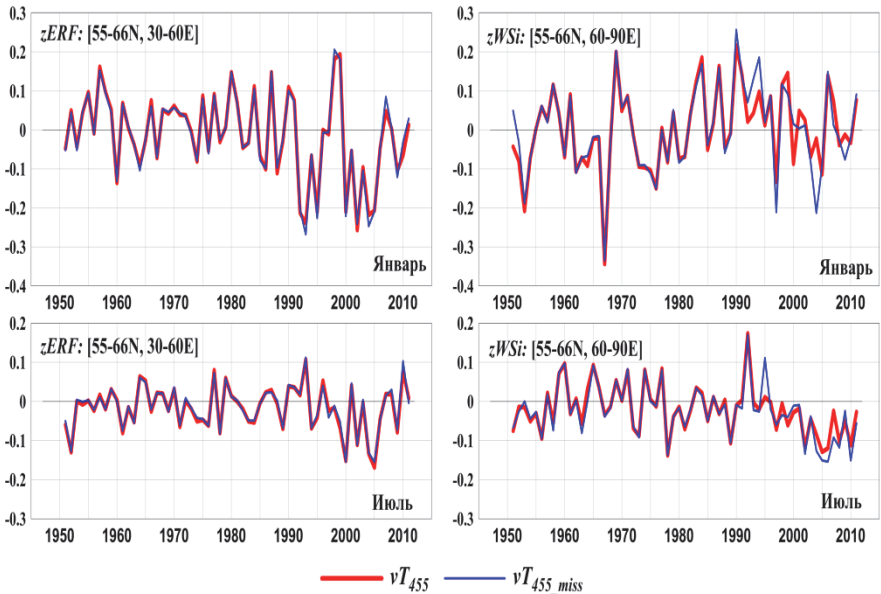


Рис. 6. Временные ряды «межмодельных» различий (между методами осреднения *Vox1* и *Thies*) для январских и июльских аномалий температуры в европейском ($zERF$) и западносибирском ($zWSi$) регионах. Осреднение выполнено по интерполированным данным vT_{455} и vT_{455_miss} за 1948-2011 гг.

В таблице 8 приведены оценки попарного сопоставления рядов средних аномалий температуры для каждого из трех регионов и каждого из исходных массивов, но в среднем по четырем рассмотренным методам пространственного осреднения. Эти оценки позволяют выявить зависимость результатов от региона осреднения, плотности и полноты данных и от календарного периода (сезона).

**Обобщенные (по парам методов Vox1, Vox2, Grads и Thies) оценки
«межмодельных» различий результатов регионального осреднения в
зависимости от региона осреднения, календарного периода и
используемого входного массива**

| Оценки | [55-66° с.ш., 30-140° в.д.] | | | [55-66° с.ш., 30-60° в.д.] | | | [55-66° с.ш., 60-90° в.д.] | | |
|--------------------|-----------------------------|------------|------------------|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|------------|------------------|
| | vT_{2910} | vT_{455} | vT_{455_miss} | vT_{2910} | vT_{455} | vT_{455_miss} | vT_{2910} | vT_{455} | vT_{455_miss} |
| Год | | | | | | | | | |
| <i>E</i> | 0,000 | -0,001 | 0,001 | 0,002 | -0,004 | -0,004 | 0,001 | -0,008 | -0,008 |
| <i>Q</i> | 0,016 | 0,022 | 0,026 | 0,018 | 0,027 | 0,027 | 0,023 | 0,050 | 0,052 |
| <i>A</i> | 0,018 | 0,026 | 0,031 | 0,021 | 0,030 | 0,030 | 0,023 | 0,051 | 0,052 |
| <i>corr</i> | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 |
| <i>b</i> | 0,000 | 0,001 | 0,002 | -0,001 | -0,003 | -0,003 | 0,000 | 0,001 | -0,001 |
| Январь | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | -0,001 | -0,005 | -0,010 | 0,003 | -0,009 | -0,010 | -0,002 | 0,001 | 0,002 |
| <i>q</i> | 0,062 | 0,084 | 0,096 | 0,073 | 0,105 | 0,103 | 0,088 | 0,160 | 0,167 |
| <i>δ</i> | 0,020 | 0,028 | 0,032 | 0,022 | 0,032 | 0,031 | 0,024 | 0,044 | 0,046 |
| <i>corr</i> | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 |
| <i>b</i> | 0,004 | -0,003 | -0,004 | -0,001 | -0,011 | -0,011 | -0,001 | 0,009 | 0,006 |
| Июль | | | | | | | | | |
| <i>e</i> | 0,001 | -0,011 | -0,009 | -0,002 | -0,013 | -0,012 | 0,000 | -0,015 | -0,018 |
| <i>q</i> | 0,022 | 0,053 | 0,064 | 0,036 | 0,064 | 0,064 | 0,043 | 0,088 | 0,099 |
| <i>δ</i> | 0,030 | 0,074 | 0,088 | 0,025 | 0,044 | 0,044 | 0,030 | 0,063 | 0,070 |
| <i>corr</i> | 1,000 | 0,998 | 0,997 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 0,998 | 0,998 |
| <i>b</i> | -0,001 | -0,005 | -0,006 | -0,002 | -0,003 | -0,004 | -0,002 | -0,007 | -0,009 |

Условные обозначения см. в таблице 7.

Так, при переходе от полных сеточных данных vT_{2910} к сети станций vT_{455} среднеквадратическое различие региональных средних q (потенциальная ошибка осреднения) увеличивается, т.е. точность осреднения уменьшается. Уменьшается она и при переходе от среднегодовых аномалий к месячным и от европейского региона к западносибирскому. Тем не менее, во всех вариантах оценка q не

превышает $0,1^{\circ}\text{C}$, за исключением варианта «западносибирский регион, январь», в котором она достигает $0,16^{\circ}\text{C}$.

Зависимость результатов осреднения от наличия пропусков во входных данных (оценки для vT_{455_miss} в сравнении с vT_{455}) не столь однозначна: в Западной Сибири точность осреднения по данным с пропусками уменьшилась (ошибка увеличилась), тогда, как в европейском регионе точность оценок практически не изменилась.

Такой результат вполне согласуется с конфигурацией сети 455 станций (см. рис. 1), указывающей на избыточную плотность станций в европейской части России. Понятно, однако, что полноценный анализ данного эффекта требует более тщательного учета реальной освещенности территории региона данными обоих входных массивов.

Что касается оценок трендов, то все оценки таблицы 8 указывают на отсутствие сколько-нибудь заметных различий в них для всех методов и массивов. То же следует отметить в отношении межгодовых колебаний аномалий температуры – корреляция рядов во всех экспериментах близка к единице.

Заключение

Сопоставление рядов регионально осредненных аномалий температуры воздуха, полученных различными методами пространственного осреднения для трех избранных регионов РФ, показало, что между методами нет систематического смещения – среднее различие во всех экспериментах составило менее $0,01-0,02^{\circ}\text{C}$.

Межгодовые колебания в рядах регионально осредненных аномалий температуры при использовании различных методов пространственного осреднения отображаются синхронно – оценки корреляции между сравниваемыми рядами во всех вариантах (сеточные и станционные входные данные, разные регионы и сезоны) близки к 1. Практически одинаковы для всех методов и массивов и оценки трендов – расхождения находятся в пределах $0,01^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$.

Оценки стандартного отклонения «межмодельных» (между методами осреднения) различий регионально осредненных годовых аномалий температуры, рассчитанных по полным сеточным данным реанализа NCEP/NCAR, составляют менее $0,02^{\circ}\text{C}$.

По данным 455 станций эти оценки для разных регионов колеблются в интервале 0,019-0,024°C при полном отсутствии пропусков наблюдений и в интервале 0,021-0,028°C в условиях реальной полноты данных в базовом массиве мониторинга климата. Соответственно, доверительный 95%-й интервал ожидаемых ошибок осреднения (при использовании аномалий температуры на сети 455 станций) можно оценить в $\pm 0,04^\circ\text{C}$ для среднегодовых значений, $\pm 0,17^\circ\text{C}$ для января и $\pm 0,08^\circ\text{C}$ для июля.

Влияние пропусков наблюдений в базовом массиве мониторинга климата стало заметно с середины 1990-х годов и сохраняется до текущего времени. До середины 1990-х годов полнота данных вполне приемлемая.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00326а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. 2012. Об оценках изменений климата регионов России в XXв. и начале XXIV. по данным наблюдений. Метеорология и гидрология. № 6. С. 95-107.
2. Ранькова Э.Я., Груза Г.В. 2012. Комментарий к статье Анисимова О.А., Жильцовой Е.Л. «Об оценках изменений климата регионов России в XX в. и начале XXI в. по данным наблюдений». Метеорология и гидрология. № 7. С. 100-103.
3. Brohan P., Kennedy J.J., Haris I., Tett S.F.B., Jones P.D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research* V. 111. 35 P. D12106, doi:10.1029/2005JD006548
4. Clark Labs. 2012. Геоинформационная система Idrisi 32. – <http://clarklabs.org/>
5. Cline A.K. 1984. FITPACK: A Software Package for Curve and Surface Fitting Employing Splines Under Tension. Pleasant Valley Software, Austin.
6. Doty B., Kinter J.L. III. 1992. The Grid Analysis and Display System (GrADS): A practical tool for earth science visualization. Eighth International Conference on Interactive Information and Procession Systems. Atlanta, Georgia, 5-10 January 1992.
7. Doty B., Kinter J.L. III 1993. The Grid Analysis and Display System (GrADS) and update. Ninth International Conference on Interactive Information and Processing Systems. Anaheim, CA, 17-22 January 1993.
8. Hansen J.R., Ruedy R., Sato M., Lo K. 2010. Global surface temperature change. – *Rev. Geophys.* Vol. 48 RG4004, doi:10.1029/2010RG000345. 1-29 P.

9. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S. et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 82, №2. P. 247-267.
10. Peterson T.C., Vose R.S. 1997. An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database. Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 78. P. 2837-2849.
11. Renka R.J. 1997a. Algorithm 772: STRIPACK: Delaunay Triangulation and Voronoi Diagram on the Surface of a Sphere. ACM Transactions on Mathematical Software. V. 23, №3. P. 416-434.
12. Renka R.J. 1997b. Algorithm 773: SSRFPACK: Interpolation of Scattered Data on the Surface of a Sphere with a Surface under Tension. ACM Transactions on Mathematical Software. V. 23, №3. P. 435-442.
13. Smith T.M., Reynolds R.W., Peterson T.C., Lawrimore J. 2008. Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). J. Climate. V. 21. P. 2283-2293.