

Об оценках изменений климата 20 и начала 21 веков по данным наблюдений на территории России

Анисимов О.А., Жильцова Е.Л.

ГУ «Государственный гидрологический институт», E-mail: oleg@oa7661.spb.edu

Введение

Бесспорно признанным является утверждение о том, что оценки будущего климата могут быть получены лишь с достаточно большой неопределенностью, которую принято считать обусловленной неточностью гидродинамических моделей и невозможностью достоверно определить эмиссии основных парниковых газов в будущем [8]. Не столь очевидно, что и прошедшие климатические изменения, даже при наличии данных наблюдений, можно оценить лишь с некоторой неопределенностью. Причин тому несколько, главными являются нарушения однородности рядов наблюдений, недостаточная плотность сети и ее изменения, а также различия алгоритмов пространственного осреднения данных. Перечисленные обстоятельства особенно актуальны для России и стран бывшего СССР, поскольку наблюдательная сеть на этой территории крайне неоднородна и, начиная с 1990х годов, постоянно сокращалась. В таких условиях выводы о том, сколь велики и значимы были региональные изменения климата, во многом определяются выбором репрезентативных станций и алгоритмом обработки данных, в частности, методом пространственного осреднения наблюдений в условиях редкой и неоднородной сети. Немалую роль при осреднении данных играет также деление территории на составляющие регионы, которые должны быть однородны в отношении современных климатических изменений. И, наконец, важно правильно выбрать модель региональных изменений климата на рассматриваемом интервале времени.

Обычно рассматривается модель линейного тренда, при помощи которой проводится сравнение изменений климата за вековой интервал времени с трендами за последние несколько десятилетий. Такой традиционный подход применяется и в этой работе, главным образом для того, чтобы обеспечить сопоставимость с результатами предшествующих исследований. Отметим, что в ряде публикаций [1, 14] была предложена другая модель скачкообразных изменений ряда наблюдений, предполагающая наличие нескольких статистически различающихся режимов климата на рассматриваемом вековом интервале. В данной работе анализируется репрезентативность данных сети наблюдений за температурой воздуха и осадками на территории России, представленных двумя климатическими архивами месячной дискретности. Проводится сопоставление различных алгоритмов пространственного осреднения данных и схем районирования на основе физико-географического, биоклиматического и административного территориального деления на примере оценок трендов температуры воздуха и осадков в 20 и в начале 21 века.

Репрезентативность наблюдений за температурой воздуха и осадками.

В России к 1970-м годам была разработана концепция «оптимальности сети метеонаблюдений» на основе анализа пространственно-временной структуры полей метеоэлементов, в первую очередь температуры воздуха [4, 5]. Несмотря на значительные усилия по оптимизации сети метеостанций, эта задача была решена лишь частично. К 1986 году был достигнут максимум численности станций (2297) на территории России и сопредельных стран, входивших в СССР, причем размещение новых станций не всегда было оптимальным, поскольку они часто создавались внепланово для обеспечения специфических нужд отдельных министерств и ведомств. В последующие годы сеть сокращалась, и по состоянию на 2008 год, согласно данным, опубликованным в [3], Государственная наблюдательная сеть на территории России насчитывает 1627 станций. Сокращение было неравномерным по территории и затронуло в первую очередь труднодоступные районы. Так, в Российской Арктике численность

станций за последние 25 лет сократилась вдвое, в результате чего в этом важном регионе репрезентативность сети значительно уменьшилась. Действующие в настоящее время метеостанции размещены по территории страны весьма неравномерно. В центральной части ЕТР одна станция приходится в среднем на 4.6 тыс. кв. км., что является вполне приемлемым показателем, в то время как в Арктике на каждую станцию приходится около 25.1 тыс. кв. км. В среднем по России эта величина равна 10.5 тыс. кв. км, для сравнения, в развитых европейских странах и в Америке она составляет 0.9-4.5 тыс. кв. км.

Для оценки изменений климата можно использовать данные лишь части имеющихся станций, поскольку необходимым условием является наличие длительных рядов однородных наблюдений с малым числом пропусков. В институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ) был создан и постоянно обновляется архив месячных температур воздуха и сумм осадков, удовлетворяющий этим требованиям. Он содержит данные 455 метеостанций, из которых 310 расположены в России, а оставшиеся – на территории сопредельных государств. Наблюдения охватывают период с конца 19 – начала 20 века по настоящее время. Этот архив, обозначаемый далее в статье «архив ИГКЭ», послужил основой большинства отечественных работ по анализу современных изменений климата, а также традиционно используется при подготовке ежегодных докладов Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации.

Еще один архив температуры воздуха и осадков был создан во ВНИИГМИ-МЦД [2]. Он содержит данные 518 метеостанций на территории России, из которых 229 совпадают с архивом ИГКЭ, а оставшаяся часть дополняет его. Большинство станций этого архива имеют малое число пропусков наблюдений. Вместе с тем ряды осадков по многим станциям имеют небольшую продолжительность, начинаясь лишь в 1960-х годах. Объединенный архив ИГКЭ и ВНИИГМИ содержит 744 метеостанции, из которых 625 расположены в России (включая островные станции), а оставшиеся – на территории сопредельных государств, при этом данные

станций архива ВНИИГМИ в настоящее время заканчиваются 2008 годом. Расположение станций объединенного архива показано на рисунке 1.

Лишь 135 Российских станций, большинство которых находятся в азиатской части, входят в глобальную сеть наблюдений за климатом ВМО [3]. Очевидно, эта выборка слишком мала, поскольку она не характеризует в полной мере все 10 климатических зон с несколькими подзонами в каждой из них, которые классификация Будыко-Григорьева выделяет на территории России [6].

В последнее десятилетие, отчасти из-за сложности получения доступа к данным метеостанций, все большее применение в российских и зарубежных исследованиях находят данные сеточных архивов, в том числе и модельного реанализа, разрабатываемые в зарубежных научных центрах. Не останавливаясь на детальном обсуждении качества таких архивов, заметим лишь, что они не улучшают обеспеченность территории России метеоданными. Как было показано в нашей предшествующей работе [11], имеют место значительные расхождения между данными сеточных архивов и фактическими наблюдениями на метеостанциях.

Важно иметь представление о том, насколько репрезентативна существующая сеть метеонаблюдений. Теоретически оценить репрезентативность сети можно, рассчитав пространственную корреляционную функцию метеоэлементов. Определив с ее помощью характерное расстояние, на котором коэффициент корреляции наблюдений в двух точках уменьшается до приемлемого уровня, можно рассчитать оптимальную конфигурацию сети и сравнить ее с реальной. Решить эту задачу для всей территории России до сих пор не удавалось, поскольку, как ни парадоксально, для расчета пространственной корреляционной функции требуется сеть избыточной плотности. Практически этот метод можно использовать лишь для оптимизации сокращения сети в регионах, где она избыточна. Кроме того, возникают сомнения, применим ли такой подход к анализу наблюдений за осадками, поле которых не обладает свойством непрерывности в пространстве. С учетом этих ограничений можно подойти к оценке репрезентативности сети в контексте современных изменений климата с других позиций,

анализируя тренды температуры воздуха и осадков для регионов России, рассчитанные различными методами. В случае, если сеть репрезентативна, т.е. плотность размещения метеостанций соответствует пространственно-временной структуре полей метеоэлементов, различия региональных трендов, обусловленные особенностями алгоритмов пространственного осреднения, будут минимальны. В какой-то степени справедливо и обратное, т.е. в тех регионах, где различные методы дают близкие результаты при анализе трендов температуры воздуха и осадков, сеть можно считать репрезентативной в отношении современных изменений климата.

Сказанное справедливо лишь при условии адекватной пространственной фрагментации рассматриваемой территории, т.е. разбиения ее на регионы, которые, с одной стороны, не слишком малы и содержат несколько метеостанций, а с другой – достаточно однородны в плане синхронности и величины современных климатических изменений.

Алгоритмы пространственного осреднения метеоданных.

Для пространственного осреднения данных метеонаблюдений различными авторами были разработаны несколько методов. Простейший состоит в арифметическом осреднении данных метеостанций, расположенных в рассматриваемом регионе, и этот подход вплоть до настоящего времени находит применение в некоторых работах. Его очевидным недостатком является равный учет данных всех метеостанций, независимо от того, какую пространственную область они представляют. Информационный вклад каждой метеостанции в общую картину полей метеоэлементов тем выше, чем большую площадь характеризуют ее данные. Особенно важно это учитывать и производить осреднение данных с соответствующими весами при недостаточной плотности наблюдательной сети. Применяемые схемы осреднения с весами основаны на различных принципах.

В основополагающих современных исследованиях климата на территории Российской Федерации, проводимых Росгидрометом, для оценки трендов температуры и осадков применяется методика, разработанная в ИГКЭ [3, 10, 13]. По ней проводится простое арифметическое осреднение данных метеостанций по ячейкам регулярной сетки с шагом 5 градусов по широте и долготе. Далее при осреднении по какой-либо территории учитывается в качестве весового коэффициента площадь попадающих в него ячеек, которая меняется пропорционально косинусу широты.

Для редкой наблюдательной сети с неравномерным размещением метеостанций, как это имеет место во многих регионах России, такой алгоритм нельзя признать совершенным, поскольку в пределах каждой ячейки все станции имеют равные веса, что фактически постулирует однородность полей температуры и осадков в достаточно крупных ячейках, в то время как в действительности ее может и не быть. Более корректно станциям, расположенным на территории с высокой плотностью сети, придавать меньший вес, чем в районах с низкой плотностью. Нами был разработан метод, основанный на этом принципе, в котором осреднение проводится с весами, пропорциональными «области влияния» каждой станции [1]. За «область влияния» принимается геометрическое место точек, для которых станция является ближайшей. Разделение территории на области влияния широко используется во многих геоинформационных системах, соответствующий алгоритм известен как расчет полигонов Вороного-Тиссена.

Реализация данного метода состояла в следующем. В каждом архиве отбирались метеостанции с малым числом пропусков наблюдений в рассматриваемый интервал времени. К полученной выборке применялся алгоритм Вороного-Тиссена, в результате которого всё пространство, в том числе и за пределами России, разделялось на полигоны, каждый из которых содержал лишь одну станцию. На полученную полигональную картину накладывалась маска всей территории России и выделенных в ней регионов, для которых необходимо было получить дифференцированные оценки трендов температуры и осадков. При региональном осреднении

учитывались все станции, области влияния которых (полигоны Вороного-Тиссена) полностью или частично попадают в рассматриваемый регион. Данные осреднялись с весами, равными площадям соответствующих полигонов или их частей в рассматриваемом регионе, при этом полигональное разбиение пересчитывалось для каждого месяца и года рассматриваемого периода с учетом имеющихся мест пропусков наблюдений.

Оценки современных изменений климата зависят от выбора алгоритма пространственного осреднения, используемого архива данных и схемы районирования. Представляет интерес сравнить оценки, полученные различными методами, для трендов сезонных и среднегодовой температуры воздуха и осадков, осредненных по всей территории России и отдельно по составляющим ее регионам. Было использовано несколько вариантов регионального деления, подробно они обсуждаются в следующем разделе. Расчеты проводились по двум максимально различающимся алгоритмам простого и весового осреднения на основе полигонов Вороного-Тиссена с учетом станций на сопредельных территориях. Рассматривались четыре различные временные интервала, два из них – векового масштаба (1907-2006, 1907-2009) и два, охватывающие период с последней четверти 20 века (1976-2006, 1976-2009). Различные окончания периодов были выбраны с тем, чтобы обеспечить сопоставимость результатов с полученными ранее в работе [3], где анализ ограничивался 2006 годом, а также чтобы проследить влияние последних трех лет.

Для каждого рассматриваемого периода и сезона были сформированы выборки станций, число пропусков наблюдений на которых было менее 20%, причем это условие должно было выполняться как в целом за весь период, так и по отдельности на концах периодов, за которые принимались первые и последние 20% длины ряда. Выборки были сделаны как для температуры воздуха, так и для осадков. Число станций в полученных для каждого из метеоэлементов 20 выборках (4 временных интервала, 4 сезона и среднегодовые величины) изменялось от 100 до 390 по обоим архивам.

Оценки региональных трендов температуры воздуха и осадков.

В контексте проблемы изучения пространственных закономерностей современного изменения климата важен вопрос о выделении однородных климатических районов. Районирование, основанное на произвольном выборе регионов, не только не имеет физического смысла, но и уничтожает детали, по которым можно судить о причинно-следственных связях в климатической системе. В данной работе мы ограничились анализом адекватности задаче выявления и изучения региональных изменений климата вариантов районирования, использовавшихся в предшествующих исследованиях. В них на территории России выделялись 6, 15 и 22 климатических региона [1, 7-10, 12, 13]. Разделение на 6 крупных регионов по географическому признаку было предложено ИГКЭ и используется Росгидрометом в ежегодных Докладах об особенностях климата, а также в Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. В Стратегическом прогнозе изменений климата на период до 2010-2015 гг. были использованы 15 регионов, основанные на административном делении территории России [13]. Отметим, что этот вариант районирования является актуальным также и потому, что он максимально отвечает современным требованиям, предъявляемым к Росгидромету в части научного обеспечения стратегий адаптации Федеральных округов РФ к предстоящим изменениям климата. И, наконец, 22 региона представляют собой вариант административно-географического районирования, полученный дополнительным делением четырех из 15 регионов предыдущего разбиения [1].

Перечисленные варианты районирования иллюстрирует рисунок 1. На нем также показана пространственная дискретизация территории России по полигонам Вороного-Тиссена для станций объединенного архива, имеющих не более 20% пропусков наблюдений в период 1976-2008, который хорошо представлен данными обоих исходных архивов. Рисунок позволяет визуально оценить вес каждой станции при региональном осреднении. Можно отметить заметное увеличение относительного веса данных по мере уменьшения плотности сети от центрального района России на восток и на север.

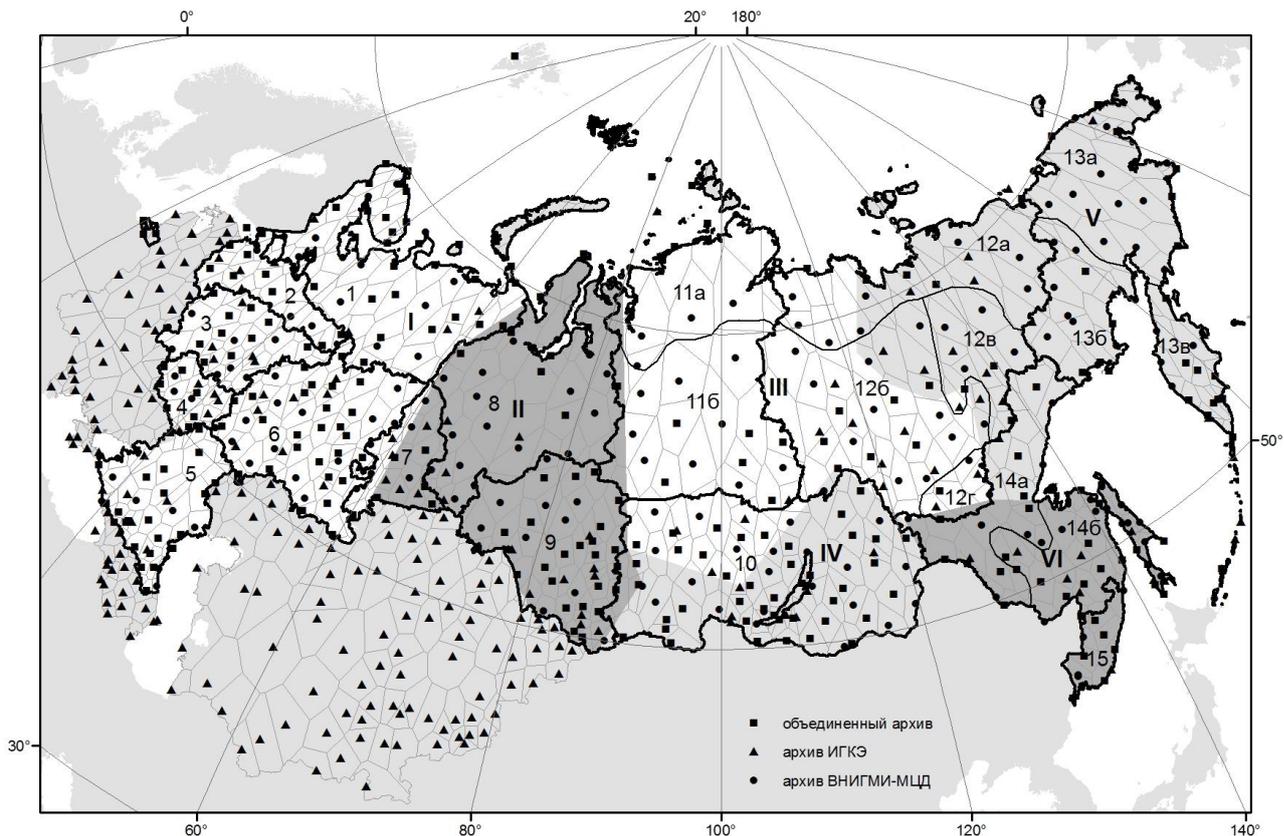


Рис. 1. Варианты дискретизации территории России с выделением различного числа регионов. Фоновой заливкой выделены 6 регионов (обозначены римскими цифрами); сплошные контуры – 15 регионов (обозначены арабскими цифрами); тонкими линиями обозначено деление, дополняющее число регионов до 22 (обозначены буквенными индексами после номера региона). Тонкими серыми линиями показаны полигоны Вороного-Тиссона для станций объединенного архива.

Количественно оценить соотношение весов станций в выборках с малым числом пропусков можно, используя гистограмму распределения площадей полигонов Вороного-Тиссена для различных архивов на рисунке 2. В архиве ВНИИГМИ средняя площадь полигона для рассматриваемой выборки станций составляет около 20 тыс. км², в архиве ИГКЭ – около 90 тыс. км². Эти оценки в несколько раз превышают среднее значение показателя плотности сети равное 10.5 тыс. км², которое получается, если принять в расчет все действующие в настоящее время на территории России станции. Иными словами, на практике пропуски наблюдений, из-за которых многие станции были отбракованы, в разы уменьшают репрезентативность сети наблюдений за климатом по сравнению с теоретической.

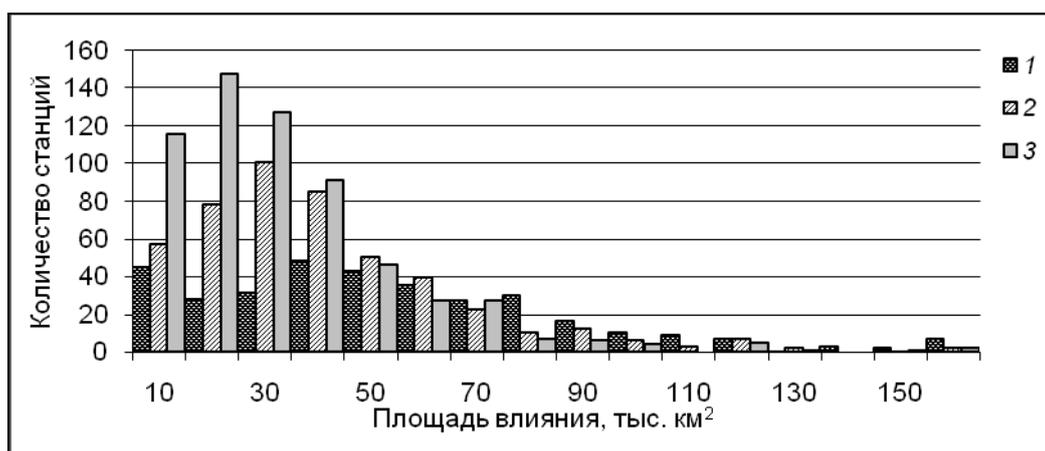


Рис. 2. Гистограммы распределения полигонов Вороного-Тиссена метеостанций (площадей влияния) для различных архивов. Расчет для станций, имеющих не более 20% пропусков наблюдений в период 1976-2008. 1 - архив ИГКЭ (455 станций), 2 - архив ВНИИГМИ-МЦД (518 станций), 3 - объединенный архив (744 станции).

Соответствующей задаче анализа климата можно считать дискретизацию территории, при которой выделяемые регионы однородны в плане синхронности и величины современных климатических изменений. Сезонные особенности полей метеоэлементов и чередование форм атмосферной циркуляции крайне осложняют задачу такого районирования. На практике ее удастся решить относительно успешно лишь исходя из пространственных закономерностей поля температуры воздуха, поскольку поле осадков имеет крайне сложную структуру и в нем невозможно выделить однородные регионы, сохраняющие неизменность своих границ для всех сезонов и форм циркуляции.

Количественными показателями адекватности районирования современным изменениям климата являются средний региональный коэффициент корреляции метеоэлементов, рассчитанный по парным сочетаниям всех метеостанций региона, и различия стационарных трендов внутри каждого региона, которые можно характеризовать дисперсией. Чем выше среднерегиональный коэффициент корреляции и чем ниже дисперсия, тем более подходящей для анализа современных изменений является районирование. Лишь в одной предшествующей работе [1] по указанным критериям проводился анализ однородности, в результате которого число климатических регионов на территории России было увеличено от первоначально

выделенных 15 до 22, поскольку 4 региона на азиатской территории страны оказались неоднородны и были разделены на более мелкие области.

Таблица 1. Средние внутрирегиональные коэффициенты парной корреляции для трех вариантов районирования территории России, рассчитанные для двух временных интервалов по данным различных климатических архивов.

Период	Сезон	Архив ИГКЭ			Архив ВНИГМИ			Объединенный архив		
		6 рег.	15 рег.	22 рег.	6 рег.	15 рег.	22 рег.	6 рег.	15 рег.	22 рег.
1907-2006	Зима	0.64	0.80	0.82	0.64	0.79	0.81	0.64	0.80	0.81
	Весна	0.71	0.83	0.85	0.72	0.83	0.84	0.72	0.83	0.85
	Лето	0.53	0.72	0.71	0.53	0.71	0.71	0.53	0.72	0.71
	Осень	0.64	0.80	0.81	0.65	0.80	0.81	0.65	0.80	0.81
	Год	0.68	0.81	0.83	0.70	0.81	0.84	0.70	0.81	0.84
1976-2008	Зима	0.64	0.79	0.80	0.62	0.79	0.80	0.63	0.79	0.80
	Весна	0.70	0.83	0.84	0.70	0.82	0.84	0.70	0.82	0.84
	Лето	0.56	0.73	0.72	0.54	0.71	0.73	0.54	0.72	0.73
	Осень	0.70	0.82	0.83	0.69	0.83	0.84	0.69	0.83	0.84
	Год	0.72	0.83	0.84	0.71	0.83	0.85	0.71	0.84	0.85

В таблице 1 сравниваются средние величины внутрирегиональных коэффициентов корреляции для трех вариантов районирования с выделением 6, 15 и 22 регионов на территории России. Сравнение указывает на то, что для всех климатических архивов и интервалов времени оптимальную репрезентативность обеспечивает деление на 15 регионов. Разделение на 6 регионов менее репрезентативно, а более детальная фрагментация с выделением 22 регионов не улучшает существенным образом однородности по выбранному критерию. Для сопоставимости с материалами, представленными в ежегодных докладах об особенностях климата и в оценочном докладе Росгидромета, которые используют архив ИГКЭ, в таблице 1 приводятся результаты отдельно для каждого из двух архивов, а также для объединенного архива. Также для сопоставимости далее рассматриваются результаты, полученные как для 6, так и для 15 регионов на территории России.

В таблице 2 сравниваются два метода пространственного осреднения данных при расчете региональных трендов температуры воздуха и осадков. Главной целью такого

сравнения было определить, насколько изменятся полученные в предыдущих работах [3, 9, 10] оценки, если для той же схемы районирования применить более детальный метод весового осреднения, использующий полигоны Вороного-Тиссена. По этой причине в таблице 2 сохранено деление РФ на 6 регионов и выбран интервал времени 1976-2006 гг. с высокими значениями трендов.

Таблица 2. Тренды температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/100$ лет) и количества осадков (мм/мес за 100 лет) за период 1976-2006 гг. для территории России в целом и составляющих ее 6 регионов, рассчитанные по архиву ИГКЭ. В числителе – осредненные значения, полученные по методике ИГКЭ (эти результаты вошли в Оценочный доклад Росгидромета), в знаменателе – результаты, полученные методом весового осреднения с использованием полигонов Вороного-Тиссена.

Рег.	Температура					Осадки				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1	6.8 / 6.3	2.8 / 2.7	4.5 / 4.6	4.5 / 4.4	4.8 / 4.9	9.7 / 9.6	22.6 / 22.9	-17.1 / -16.5	2.0 / 1.9	6.1 / 4.8
2	2.6 / 2.2	6.0 / 5.7	2.2 / 2.4	1.8 / 1.5	3.2 / 3.2	14.2 / 10.3	21.0 / 20.1	2.1 / 1.8	1.9 / 7.1	11.6 / 11.3
3	4.2 / 3.8	5.8 / 5.7	4.7 / 4.3	2.4 / 2.4	4.6 / 4.5	-1.1 / -2.8	7.7 / 7.3	15.8 / 15.0	12.2 / 11.7	9.0 / 8.4
4	3.9 / 3.9	6.6 / 6.5	5.8 / 5.8	2.1 / 2.0	4.6 / 4.6	1.1 / -0.6	1.1 / 2.6	5.4 / 11.6	17.1 / 15.1	6.8 / 5.8
5	-2.3 / -2.1	7.3 / 6.7	4.4 / 4.3	8.5 / 8.9	4.2 / 4.5	-17.5 / -15.5	11.8 / 13.7	-5.3 / -4.4	14.9 / 19.7	1.4 / 5.4
6	5.2 / 5.1	3.2 / 3.3	2.6 / 2.6	5.6 / 5.4	4.0 / 4.1	6.8 / 5.5	19.7 / 12.8	-23.4 / -28.3	-9.9 / -12.1	-2.3 / -6.3
РФ	3.5 / 3.0	5.2 / 5.1	4.1 / 4.1	4.3 / 4.2	4.3 / 4.4	6.9 / 0.4	14.0 / 14.3	-3.1 / -1.6	8.0 / 9.0	5.9 / 6.2

Сравнение трендов температуры воздуха показало, что в среднем за год почти везде оценки, полученные двумя методами, различаются не более чем на ± 0.1 $^{\circ}\text{C}/100$ лет, что несущественно. Исключение составляет Северо-Восток РФ (регион 5), где полученные новым методом оценки среднегодового тренда превышают прежние на 0.3 $^{\circ}\text{C}/100$ лет. Сильные различия, причем разного знака, получаются для весны и осени, -0.6 $^{\circ}\text{C}/100$ лет и $+0.4$ $^{\circ}\text{C}/100$ лет, соответственно. Даже визуальный анализ рисунка 1 показывает, что плотность сети в этом регионе превышает таковую в расположенных к западу от него Средней и Западной Сибири

(регионы 3 и 2), т.е. он относительно неплохо представлен данными наблюдений, при том, что имеется небольшой градиент плотности сети, направленный на север. По нашему мнению, причиной может быть то, что Северо-Восток России в значительной мере находится под влиянием центров действия атмосферы западного полушария – алеутского минимума и гонолульского максимума. Это порождает сложную пространственную структуру поля температуры, сильно меняющуюся по сезонам года, в то время как в большинстве остальных регионов в первую очередь сказывается воздействие воздушных масс, приходящих из Северной Атлантики.

При анализе сезонных трендов были выявлены существенные различия оценок, до 0.5 °C/ 100 лет в зимний период и до 0.4 °C/ 100 лет летом на всем пространстве от ЕТР до Средней Сибири (регионы 1-3). Вероятными причинами этого является в целом низкая плотность сети в Сибири, а также значительный градиент плотности в направлении к северу, в особенности на ЕТР. Несомненно репрезентативной в отношении климатического мониторинга температуры воздуха следует признать сеть в Прибайкалье и Забайкалье (регион 4), где отличия оценок во все сезоны минимальны.

Знаки выявленных различий оценок региональных трендов температуры соответствуют закономерностям современного потепления, что можно проиллюстрировать на примере ЕТР (регион 1). В направлении к северу и к востоку плотность сети станций в этом регионе уменьшается, соответственно, увеличивается вес каждой из них при осреднении. Если бы рассматриваемый регион был однороден в плане современных климатических изменений, это не сказалось бы сколько-нибудь существенным образом на среднерегиональном тренде, каким бы способом не проводился его расчет. Между тем в нескольких работах [3, 9, 10] было показано, что во все сезоны, кроме летнего, максимум потепления в этом регионе смещен по широте к центральной и южной его частям, а по долготе – к западной. Как видно из рисунка 1, в этих областях плотность станций выше, чем в среднем по региону, а следовательно, при осреднении по новому методу они имеют меньший вес, чем остальные станции. Вполне

согласуются с этим полученные результаты, согласно которым для лета новый метод осреднения дает чуть большую величину тренда, а во все остальные сезоны – меньшую, чем прежние оценки. Таким же образом, сопоставляя плотность сети и опубликованные в [3, 9, 10] карты трендов сезонных температур, построенные по данным индивидуальных станций, можно объяснить знаки различий региональных оценок, полученных двумя методами осреднения.

В отношении осадков какие-либо закономерности выделить сложно. Так, даже для годовых сумм осадков тренды, рассчитанные двумя методами, в большинстве регионов сильно различны. При анализе по сезонам результаты расчетов относительно неплохо согласуются друг с другом лишь на ЕТР. Это лишний раз подтверждает, что из-за дискретного характера пространственного поля осадков для их изучения требуется большее число метеостанций, чем для мониторинга температуры воздуха.

Представляет интерес провести сопоставление оценок региональных трендов температуры и осадков, рассчитанных за различные интервалы времени по полному объему данных объединенного архива для репрезентативного разделения территории России на 15 регионов, которые привязаны к границам Федеральных округов и делят их на более мелкие территориальные единицы (см. таблицу 4). Результаты сравнения представлены в таблице 3. Комментируя результаты расчетов и сравнивая их с рассмотренными ранее для 6 регионов России, можно отметить следующее.

Более детальное территориальное деление позволило лучше выявить региональные контрасты трендов температуры как на вековом промежутке времени, так и в последние несколько десятилетий. В вековом масштабе наибольшей контрастностью обладают тренды зимней температуры, изменяясь в пределах от 0.3 °C/ 100 лет на Северо-Западе (регион 1) до 2.9 °C/ 100 лет в Сибири (регион 10). Почти столь же значительны региональные различия трендов для весны, в то время как летом и осенью тренды меньше по величине и контрастности в пространстве. В последние десятилетия тренды повсеместно значительно увеличились во все сезоны года, причем возросла и контрастность по регионам. Так, диапазон трендов зимней

температуры составил от -2.7 °С/ 100 лет на Дальнем Востоке (регион 13) до 11.1 °С/ 100 лет на Северо-Западе (регион 2).

Таблица 3. Региональные тренды температуры воздуха (°С/ 100 лет) и осадков (мм/мес за 100 лет), рассчитанные по объединенному архиву. Числитель – простое арифметическое осреднения, знаменатель – весовое с использованием полигонов Вороного-Тиссена.

Период	Рег.	Температура					Осадки				
		Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1907-2006	1	00/03	1.7/1.8	0.5/0.5	0.1/-0.1	0.6/0.6	5/8	1 / 2	2 / 3	0 / 2	1 / 3
	2	1.4/1.5	1.9/1.9	0.8/0.7	0.4/0.3	1.2/1.2	9 / 9	0 / -1	4 / 2	3 / 0	4 / 2
	3	2.2/2.2	2.0/2.0	0.4/0.4	0.2/0.2	1.3/1.3	2 / 2	-4 / -4	-3 / -3	4 / 3	-1 / -1
	4	2.7/2.7	2.2/2.2	0.4/0.4	0.4/0.5	1.5/1.5	9 / 8	2 / 1	-6 / -5	12 / 11	4 / 4
	5	1.7/2.3	1.1/1.6	0.6/0.5	0.3/0.5	0.9/1.3	8 / 8	8 / 4	-5 / -5	3 / 2	4 / 2
	6	2.9/2.7	2.4/2.4	0.1/0.1	0.8/0.7	1.6/1.5	5 / 3	-2 / -3	3 / 2	1 / 1	2 / 1
	7	2.3/2.3	2.5/2.5	0.5/0.5	0.4/0.4	1.5/1.5	2 / 2	-2 / -1	2 / 5	2 / 3	1 / 2
	8	0.8/0.8	2.3/2.2	0.7/0.8	-0.1/-0.1	1.0/1.0	9 / 12	4 / 5	4 / 2	8 / 8	6 / 6
	9	3.0/2.8	3.1/2.8	0.9/0.7	0.9/0.9	2.0/1.9	-5 / -4	-4 / -6	-6 / -7	-6 / -5	-6 / -6
	10	2.9/2.9	2.1/2.0	0.5/0.4	1.1/1.0	1.7/1.7	1 / 1	1 / 1	0 / -1	1 / 1	1 / 0
	11	0.5/0.7	1.5/1.3	0.9/0.5	-0.2/0.2	0.7/0.7	24 / 13	11 / 7	-3 / -6	17 / 9	13 / 6
	12	2.1/1.7	1.9/1.6	0.3/0.4	-0.8/-0.6	0.9/0.8	1 / 0	0 / 1	4 / 3	7 / 8	3 / 3
	13	0.8/0.8	1.7/1.9	0.9/0.9	0.9/0.9	1.1/1.1	6 / -3	4 / 5	-3 / 5	15 / 21	6 / 7
	14	1.9/2.2	1.8/2.1	0.7/0.7	0.4/0.1	1.2/1.3	4 / 2	3 / 6	-5 / 2	0 / 5	0 / 4
	15	2.8/2.4	2.0/2.0	-0.1/0.0	0.3/0.5	1.2/1.2	0 / 2	0 / 3	8 / 14	-14 / -6	-3 / 2
РФ	1.9/1.7	2.0/1.9	0.5/0.5	0.3/0.3	1.2/1.1	5 / 4	2 / 2	0 / 0	4 / 6	2 / 3	
1976-2009	1	9.2/9.0	2.9/2.7	4.3/4.1	5.0/5.1	5.3/5.2	17 / 18	19 / 21	8 / 7	5 / 5	14 / 14
	2	11.4/11.1	3.7/3.6	4.9/5.1	4.7/5.0	6.3/6.2	10 / 11	15 / 10	4 / -6	-8 / -7	7 / 4
	3	10.0/9.9	4.0/4.0	4.8/4.9	5.6/5.6	6.1/6.2	3 / 2	5 / 6	-33 / -31	0 / -1	-5 / -5
	4	9.2/9.1	5.1/5.1	6.5/6.4	6.8/6.8	6.9/6.9	-20 / -17	-2 / -1	-41 / -39	8 / 9	-13 / -11
	5	4.4/5.4	3.2/3.6	5.7/5.8	6.0/6.3	4.9/5.3	-3 / -1	20 / 12	-18 / -22	42 / 31	11 / 5
	6	6.9/7.3	4.5/4.4	3.9/3.6	7.3/7.2	5.8/5.7	4 / 6	31 / 34	-23 / -22	-20 / -18	-1 / 1
	7	5.7/5.7	4.0/3.9	1.8/1.9	7.1/7.0	4.5/4.5	5 / 5	40 / 42	-3 / -6	-6 / -6	9 / 9
	8	4.8/3.9	4.7/5.2	2.2/2.1	3.5/2.9	3.4/3.3	9 / 11	24 / 23	2 / -1	3 / 5	11 / 10
	9	3.2/3.4	7.8/7.6	0.9/0.6	3.3/3.8	3.5/3.6	12 / 15	16 / 15	10 / 12	1 / 3	10 / 12
	10	5.0/4.8	7.2/7.0	5.2/5.1	2.4/2.3	4.7/4.6	7 / 7	8 / 6	17 / 13	16 / 20	11 / 11
	11	5.0/3.0	7.4/7.1	2.7/2.2	2.8/2.9	4.7/3.9	1 / 1	5 / 6	17 / 17	9 / 6	7 / 7
	12	2.5/2.5	5.4/5.8	5.3/5.3	6.4/6.8	5.1/5.3	-2 / -2	12 / 8	23 / 24	24 / 21	14 / 13
	13	-0.9/-2.7	8.9/8.6	4.1/4.8	8.5/8.0	5.4/4.9	-9 / -14	18 / 15	-21 / -23	5 / 3	1 / -2
	14	4.5/3.9	4.2/4.5	2.3/2.7	5.1/5.5	4.1/4.2	8 / -2	7 / 5	-8 / -11	2 / 8	3 / 1
	15	5.9/6.1	2.9/3.3	2.8/2.2	4.6/4.5	4.0/3.8	11 / 10	45 / 40	34 / 21	-36 / -38	15 / 8
РФ	5.8/4.0	5.0/5.8	3.8/3.8	5.3/5.1	5.0/4.7	4 / 3	17 / 13	-2 / 3	3 / 8	6 / 7	

Таблица 4. Соотношение между 15 регионами климатического районирования и Федеральными округами.

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

Возвращаясь к вопросу о репрезентативности сети и неопределенности региональных оценок современных изменений климата, целесообразно обратиться к данным, представленным на рисунке 3. На нем приведены абсолютные разности сезонных региональных трендов температуры, рассчитанных по данным объединенного архива за период 1976-2009 методом простого арифметического осреднения и весового осреднения с использованием полигонов Вороного-Тиссена. Как отмечалось выше, минимальные значения этой разности свидетельствуют о том, что сеть достаточна для решения задач мониторинга региональных климатических изменений. Как следует из рисунка 3, это имеет место в Центральном ФО (регионы 3 и 4), а также в юго-западной части Уральского ФО (регион 7). Относительно неплохая ситуация в Северо-Западном ФО (регионы 1 и 2), Приволжском ФО (регион 6) и на западе Дальневосточного ФО (регион 12). В остальных регионах недостаточная плотность сети приводит к значительной неопределенности оценок современного изменения температуры воздуха, в особенности в зимний период.

Выводы о репрезентативности сети, сравнении схем климатического районирования и методов пространственного осреднения, сделанные по результатам анализа трендов температуры воздуха, можно во многом распространить и на тренды осадков.

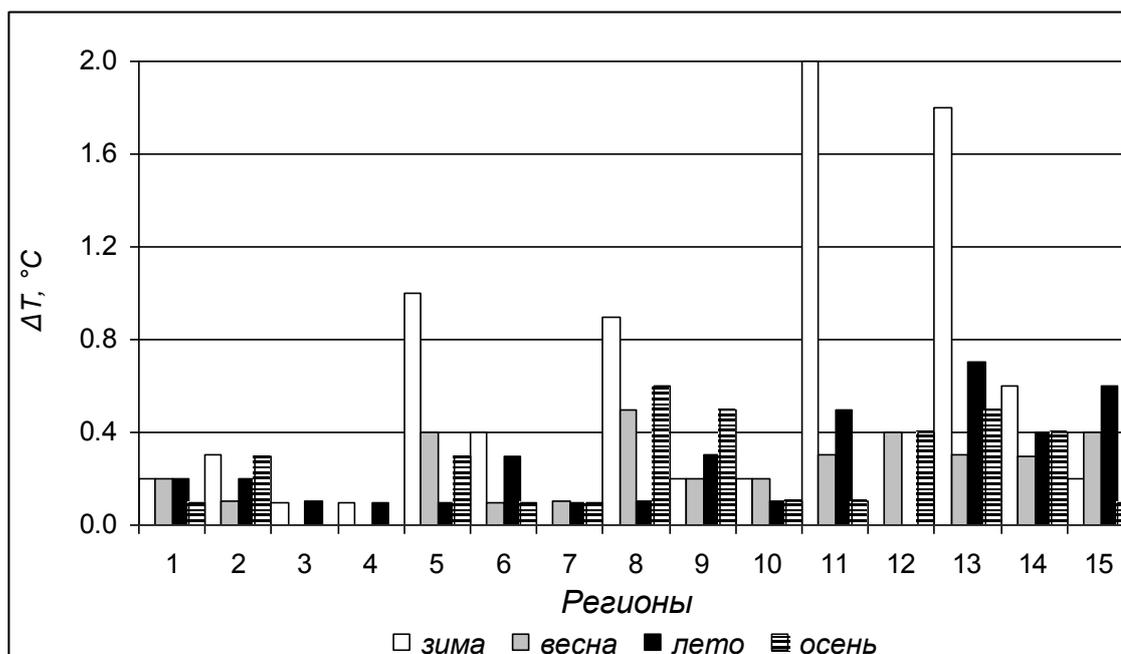


Рис. 3. Абсолютные разности сезонных региональных трендов температуры, рассчитанных по данным объединенного архива за период 1976-2009 методом простого арифметического осреднения и весового осреднения с использованием полигонов Вороного-Тиссена.

В заключение представляет интерес сравнить результаты, полученные при помощи полного объема информации по 744 метеостанциям объединенного архива с тем, что получается при использовании выборки из 135 станций, которые входят в сеть глобального климатического мониторинга ВМО. Для этой выборки были рассчитаны региональные тренды по методике весового осреднения. Ввиду ограниченного объема статьи результаты не приводятся. Отметим лишь, что для России в целом полученные значения трендов среднегодовой температуры практически совпадают, а тренды сезонных температур достаточно близки рассчитанным по полному объему информации, отличаясь не более чем на 0.2 °C/ 100 лет для зимы и не более чем на 0.1 °C/ 100 лет для остальных сезонов. Вместе с тем, различия по регионам велики и достигают 1.8 °C/ 100 лет зимой (в Центральной Сибири, регион 11), 0.8 °C/ 100 лет в другие сезоны и 0.5 °C/ 100 лет в целом за год. На основании этих результатов можно сделать вывод о том, что выбор станций ВМО оказался крайне удачным для задачи глобального климатического мониторинга, адекватно отражая динамику климата в целом на

территории России. В то же время региональные особенности эти станции отражают неудовлетворительно, что ставит под сомнение надежность выводов исследований, главным образом зарубежных, в которых данные этой выборки станций используются для анализа современных изменений климата и оценке его последствий в регионах России.

Благодарности

Авторы выражают признательность Г.В. Груза и Э.Я. Раньковой за предоставленные данные климатического архива ИГКЭ, О.Н. Булыгиной и Б.Г. Шерстюкову за полезные замечания, касающиеся данных архива ВНИИГМИ-МЦД, С.А. Реневой за техническую помощь по анализу метаданных и подготовку рисунка 1, а также рецензенту статьи за конструктивные замечания.

Литература

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. **Архив температуры воздуха и осадков месячного разрешения для территории России**, http://meteo.ru/climate/sp_clim.php, Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД.
3. Бедрицкий А.И., В.Г. Блинов, Д.А. Гершинкова, Г.С. Голицин, В.П. Дымников, Ю.А. Израэль, В.М. Катцов, В.М. Котляков, В.П. Мелешко, В.И. Осипов и С.М. Семенов, ред. **Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата.** 2008, Москва: Росгидромет, 227 с.
4. Гандин Л.С. **Объективный анализ метеорологических полей.** 1963, Л.: Гидрометеиздат, 288 с.
5. Гандин Л.С. и Р.Л. Каган. **Статистические методы интерпретации метеорологических данных.** 1976, Л.: Гидрометеиздат, 360 с.
6. Григорьев А.А. и М.И. Будыко. **Классификация климатов СССР.** - *Известия АН СССР, Сер. географическая*, 1959, № 3, с. 58-70.
7. Груза Г.В. и Э.Я. Ранькова. **Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации.** - *Метеорология и гидрология*, 2009, № 11, с. 5-29.
8. Груза Г.В., Э.Я. 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.
9. Груза Г.В., Э.Я. Ранькова и Э.В. Рочева. **Климатические изменения температуры воздуха на территории России по данным инструментальных наблюдений.** *Бюллетень "Использование и охрана природных ресурсов в России"*, №3. 2007 с.17-29.

10. Груза Г.В., Э.Я. Ранькова и Э.В. Рочева. **Изменение климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки.** В кн.: *Изменения климата: влияние внеземных и земных факторов*, Г.С. Голицин, ред. 2008, Москва: Пробел 2000. с. 11-23.
11. Жильцова Е.Л. и О.А. Анисимов. **О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами.**- *Метеорология и гидрология*, 2009, № 10, с. 79-90.
12. Мелешко В.П., Г.В. Груза, А.С. Зайцев, И.Л. Кароль, В.М. Катцов, Н.В. Кобышева, А.В. Мещерская, В.М. Мирвис, А.И. Решетников и П.В. Спорышев, ред. **Изменения климата. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.** Т. 1. 2008, Москва: ВНИИГМИ-МЦД. 227 с.
13. **Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010-2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России.** Москва, 2005.
14. Шмакин А.Б. **Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия.**- *Лед и Снег*, 2010, № 1, с. 43-58.

Аннотация

Сравниваются оценки региональных изменений температуры и осадков на территории России для двух различных методов пространственного осреднения данных метеостанций, один из которых адаптирован к редкой наблюдательной сети и учитывает веса станций, пропорциональные области их влияния. Рассматриваются несколько вариантов районирования с выделением различного числа регионов. Формулируется критерий адекватности районирования задаче выявления и анализа региональных изменений климата. Оценивается репрезентативность сети наблюдений за температурой и осадками по отдельным регионам. Приводятся оценки региональных трендов температуры воздуха и осадков за вековой интервал и за последние десятилетия, полученные на основе полного объема доступных данных для районирования, привязанного к административному делению РФ на Федеральные округа.

Abstract

We compare regional trends of air temperature and precipitation for Russia obtained by means of two different interpolation schemes. One of the schemes is specifically adopted to the sparse observational network and accounts for the different weights proportional to the spatial domain of the station. Climatic classifications with different number of regions have been analyzed. We formulated the criterion for evaluating the quality of the climatic classification with respect to detection and analysis of the regional climate change and apply it to observational meteorological network. In the end we present regional trends of the air temperature and precipitation for Federal Districts of Russia.