

УДК 551.583

Линейные тренды среднесезонной приземной температуры воздуха и современные тенденции изменения регионального климата Сибири

В.С. Комаров, С.Н. Ильин, Н.Я. Ломакина, А.В. Лавриненко*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.04.2016 г.

Приводятся результаты исследования долговременных изменений среднесезонной приземной температуры воздуха на территории Сибири за последние 43 года (1973–2015), а также за период 1973–2005 гг., когда отмечалось наиболее интенсивное глобальное потепление, и период 2006–2015 гг., соответствующий периоду замедления глобального потепления или даже его похолодания в отдельных регионах. Показано, что в повышении приземной температуры воздуха над Сибирским регионом, наблюдаемом за период с 1973 по 2015 гг., основной вклад давали зимний и весенний сезоны. Наибольший вклад в понижение интенсивности потепления за последнее десятилетие внесло похолодание в зимний сезон в арктических областях Сибири, а также в осенний сезон на территории Западной Сибири и юго-западе Восточной Сибири.

Ключевые слова: среднесезонная приземная температура воздуха, тренд, Сибирский регион; average seasonal surface air temperature, trend, Siberian region.

Введение

Хорошо известно, что средняя приземная температура воздуха для глобального масштаба поднялась более чем на $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за последние 100 лет [1]. Глобальное потепление привело к повышению уровня моря, таянию ледников, отступлению арктического морского льда, увеличению частоты и интенсивности тропических циклонов и общему снижению снегового покрытия. Однако наблюдаемое потепление не происходит равномерно во времени и пространстве. Например, скорость глобального потепления в течение 1901–2005 гг. составляла около $0,075\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, в то время как в течение 1981–2005 гг. — около $0,23\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Кроме того, как показывают наблюдения, в периоды 1950–1970 гг. и 1998–2007 гг. отсутствовало какое-либо значимое увеличение тренда средней приземной температуры, несмотря на увеличение концентрации парниковых газов [1].

В ранее опубликованной нами работе [2] приводятся результаты статистического анализа линейных трендов среднемесячных аномалий температуры пограничного слоя атмосферы для территории Сибирского региона за период 1981–2010 гг. (для января) и 1980–2009 гг. (для июля). Показано, что на фоне второго и наиболее интенсивного глобального потепления климата, начавшегося с середины 70-х гг.

XX в. [3, 4], зимой над территорией отдельных регионов Земли, в том числе и Сибири, в последние 30-летия стали проявляться слабые отрицательные тренды приземной температуры воздуха. Кроме того, из [2] следует также, что при сопоставлении аномалий температуры, рассчитанных для последнего (2001–2010 гг.) и предшествующего (1991–2000 гг.) десятилетий, отмечается, причем независимо от взятого сезона, уже существенное замедление интенсивности потепления регионального климата или даже его похолодание.

Следует подчеркнуть, что приведенные в [2] результаты являются пока лишь предварительными и требуют своего дальнейшего подтверждения на более полном статистическом материале, а также с учетом данных наблюдений самых последних лет. Это обусловлено тем, что в работе [2]:

— в качестве исходного материала были использованы многолетние данные только радиозондовых наблюдений, взятых при этом за ограниченный период (1981–2010 гг.) с большим временным интервалом между соседними измерениями в 12 ч (00:00 и 12:00 по GMT);

— для анализа взяты данные наблюдений лишь десяти аэрологических станций Сибири: Диксон, Тикси, Салехард, Туруханск, Якутск, Верхоянск, Омск, Новосибирск, Алдан, Чита;

— в качестве базовых статистических параметров использованы среднемесячные значения приземной температуры воздуха только за два срединных месяца (январь и июль).

* Валерий Сергеевич Комаров; Сергей Николаевич Ильин; Наталья Яковлевна Ломакина (lnya@iao.ru); Андрей Викторович Лавриненко (gfm@iao.ru).

Кроме того, важным фактором при анализе любого тренда является выбор начала и конца рассматриваемого временного интервала, а также его протяженность во времени [5]. Как правило, в качестве интервала рассмотрения берется либо целиком весь период с доступными наблюдениями, либо он разбивается на несколько интервалов с целью сравнения изменения переменных в динамике. Если интервалы короткие и берутся произвольно, необходимо проверять статистическую значимость методами, изложенными, например, в [6]. Важно помнить, что статистическая значимость будет маленькой и выводы, сделанные на основе анализа таких трендов, нельзя интерпретировать в качестве индикатора долгопериодных изменений [5].

С учетом всего вышесказанного, а также отсутствия в современной метеорологической литературе надежных результатов исследования особенностей линейных трендов долговременного изменения температуры воздуха над территорией Сибирского региона, рассчитанных по данным метеорологических наблюдений за максимально допустимые (по длительности) временные статистические ряды, и было проведено настоящее исследование. Об этих результатах и пойдет речь ниже.

Исходные данные и методика их статистической обработки

Основным исходным материалом, использованным для формирования многолетних рядов средне-сезонной приземной температуры воздуха и определения их линейных трендов, послужили данные 43-летних (1973–2015 гг.) 8-срочных наблюдений 62 метеорологических станций Сибири, представляющих ее различные физико-географические районы. Эти данные заимствованы из архива NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/>).

При этом большое значение для вычисления линейных трендов приземной температуры воздуха имеет необходимость задать заранее начальный год, с которого будет построен временной ряд, и временные интервалы, на которых будет проведено исследование. В настоящей работе в качестве начального года выбран 1973 г., предшествующий началу периода второго глобального и интенсивного антропогенного потепления, который начался приблизительно с 1976 г. [3, 4, 7–10]. В то же время для наиболее достоверной оценки современных трендов приземной температуры были взяты данные, включающие в себя наблюдения за самые последние годы XXI в. (2014 и 2015 гг.). Само исследование проводилось с использованием таких обобщающих (статистических) характеристик, как ежегодные среднесезонные значения приземной температуры, рассчитанные по данным среднемесячных значений каждого года, линейные тренды их долговременного изменения и их интенсивности за весь рассматриваемый период времени (1973–2015 гг.), а также за временные интервалы с 1973 по 2005 г., когда отмечалось наиболее интенсивное глобальное потепление климата [3, 4, 7–10], и с 2006 по 2015 г., когда на

значительной части территории Северного полушария проявилось заметное ослабление интенсивности глобального потепления или даже его похолодание [3, 4, 9, 10]. Замедление глобального потепления по данным только наземных станций проявилось приблизительно с 2006 г., однако с учетом измерений над поверхностью океанов замедление потепления началось приблизительно с 2001 г. [5].

Предварительно подробнее остановимся на методике обработки исходных данных. По данным 8-срочных наблюдений на 62 метеорологических станциях Сибирского региона для каждой станции были построены временные ряды наблюдений за приземной температурой воздуха для четырех сезонов. Для зимы данные наблюдений усреднялись за декабрь прошлого года и январь и февраль текущего. Для весны, соответственно, — за март, апрель, май, для лета — июнь, июль, август и осени — сентябрь, октябрь, ноябрь. Первоначально данные для каждой станции усреднялись на месячном интервале. В случае, если за определенный месяц все данные отсутствовали, пропущенное среднемесячное значение для определенного года заменялось средним месячным значением, вычисленным как среднее арифметическое на всем рассматриваемом интервале с 1973 по 2015 г. И только потом вычислялось среднее сезонное значение как среднее арифметическое по 3 мес сезона для каждой станции наблюдения. Такой подход позволял исключить значительные смещения в оценке средних сезонных значений в том случае, если на рассматриваемом сезонном интервале для определенной станции существовали наблюдения только в одном из месяцев сезона, а усреднение проводилось сразу за весь сезон с учетом среднего многолетнего значения. Количество пропусков данных для отдельных станций составляло от 0 до 18 мес за весь период наблюдений, а длительность выборки равна 516 мес.

Для наглядности представления результатов были использованы картографические изображения пространственного распределения линейных трендов или интенсивностей изменения значений среднесезонной приземной температуры воздуха. Значения уклонов трендов температуры, полученные для каждой из 62 станций, были интерполированы в узлы регулярной сетки с шагом 100×100 км. Общий размер сетки составил 47×28 точек. В качестве схемы интерполяции использовался подход средне-взвешенной оценки по k ближайшим точкам наблюдений с использованием алгоритма фильтра Калмана. При этом было выбрано $k = 3$.

Результаты исследования

Рассмотрим полученные результаты, проанализировав особенности долговременных изменений приземной температуры воздуха, наблюдаемые над территорией Сибирского региона за последние 43 года (1973–2015 гг.), а также за периоды 1973–2005 гг. (когда отмечалось наиболее интенсивное глобальное потепление) и 2006–2015 гг. (период замедления глобального потепления или даже его похолодания

в отдельных регионах). О характере полученных трендов можно судить из рис. 1–3, на которых даны пространственные распределения интенсивностей линейных трендов среднесезонной приземной температуры воздуха, построенные по данным 62 метеорологических станций Сибирского региона, для четырех сезонов (зимы, весны, лета и осени) и для трех периодов: 1973–2015, 1973–2005 и 2006–2015 гг., а также из рис. 4, где в качестве примера приведены долговременные изменения среднесезонной приземной температуры воздуха и их линейные тренды за последние 43 года для четырех типичных метеорологических станций Сибири и четырех сезонов.

Как видно из рис. 1, за весь рассматриваемый 43-летний период с 1973 по 2015 г. над всей территорией Сибири и во все сезоны преобладают положительные тренды, не превышающие $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. И только для весеннего сезона почти для всей рассматриваемой территории интенсивность потепления увеличивается, но не превышает $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Осенью во всех арктических широтах Сибирского региона, а зимой в арктических широтах лишь Западной Сибири интенсивность положительных трендов также варьирует в пределах от $0,05$ до $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Кроме того, зимой на территории всей Сибири, причем на различных широтах (арктических, субарктических и умеренных) присутствуют отдельные области со слабоотрицательными

трендами изменения температуры, не превышающими $-0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

На рис. 2 представлены пространственные распределения трендов среднесезонных приземных температур воздуха на территории Сибирского региона для периода с 1973 по 2005 г., когда наблюдалось увеличение интенсивности потепления. Как видно из рис. 2, общие положительные тренды изменения приземной температуры воздуха свойственны всем рассматриваемым сезонам и наблюдаются во всех широтах, хотя их пространственное распределение значительно отличается от периода 1973–2015 гг. Основное потепление отмечается, как и в предыдущем случае, весной, при этом наибольшая интенсивность – от $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ до $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ – наблюдается в центральных районах Сибирского региона. Над остальной частью Сибири интенсивность весеннего потепления не превышает $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а в крайних ее западных областях прослеживаются слабые отрицательные температурные тренды. Значительный рост интенсивности тренда приземной температуры – до $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ и более – также отмечается зимой во всех умеренных широтах Сибири, за исключением Забайкалья. Летом и осенью практически на всей площади рассматриваемого региона наблюдается слабое потепление с интенсивностью, не превышающей $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, за исключением отдельных областей, в которых имеет место

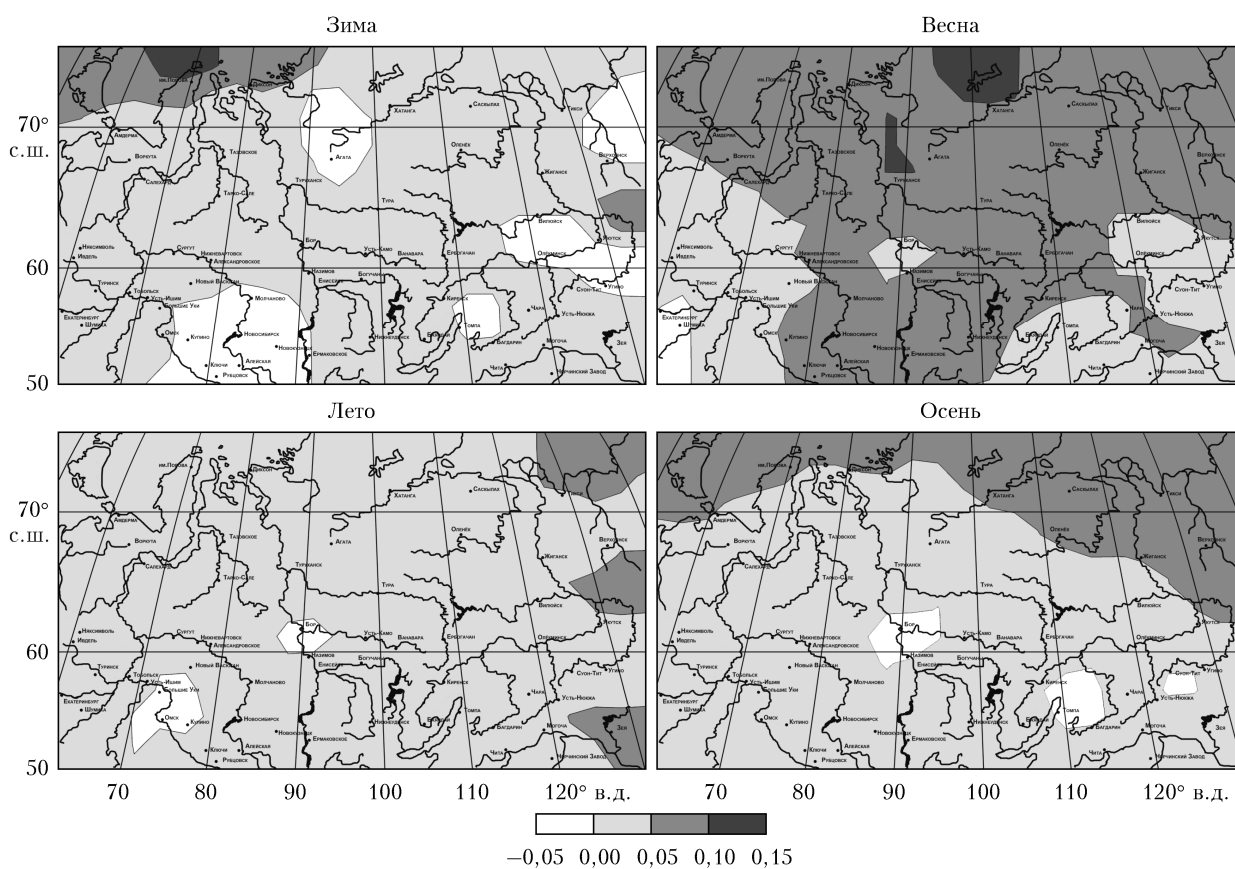


Рис. 1. Пространственное распределение интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонной приземной температуры воздуха на территории Сибирского региона за период 1973–2015 гг.

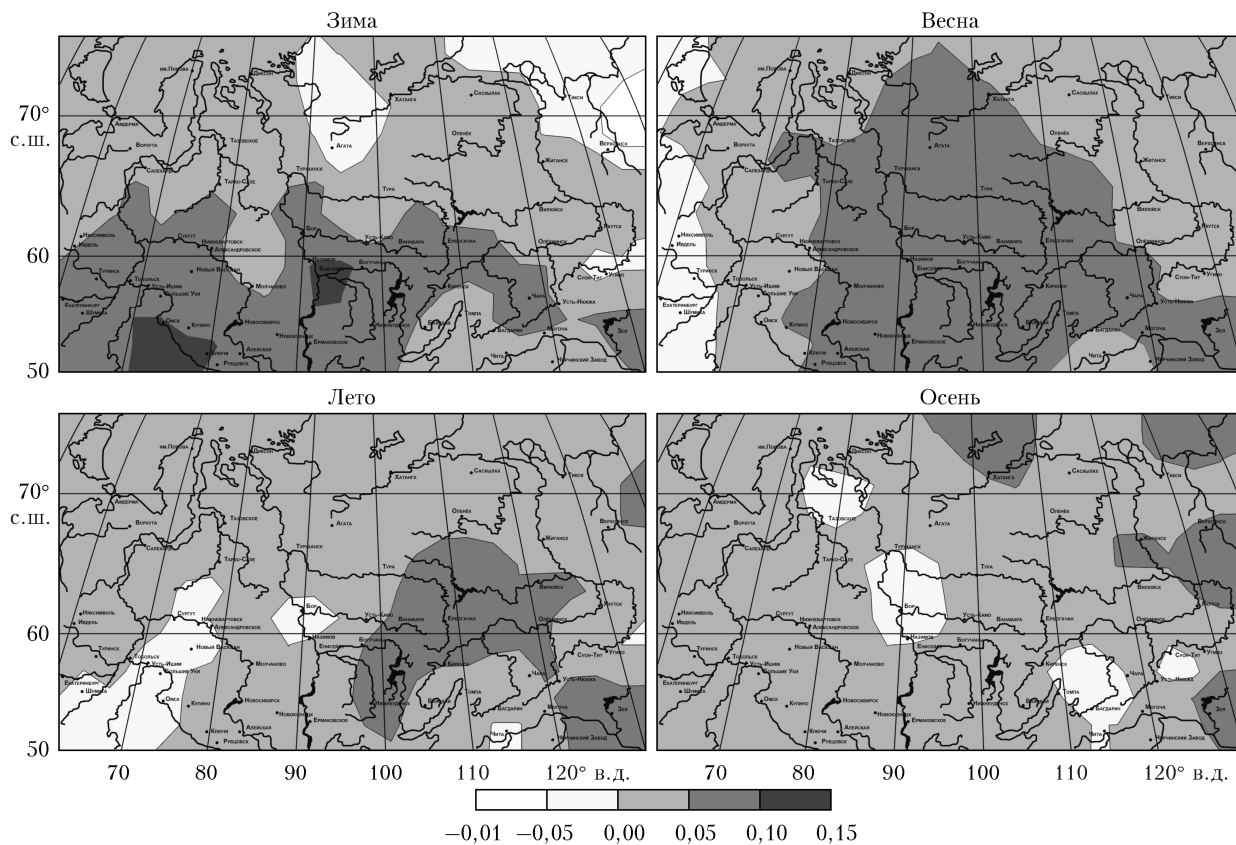


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонной приземной температуры воздуха на территории Сибирского региона за период 1973–2005 гг.

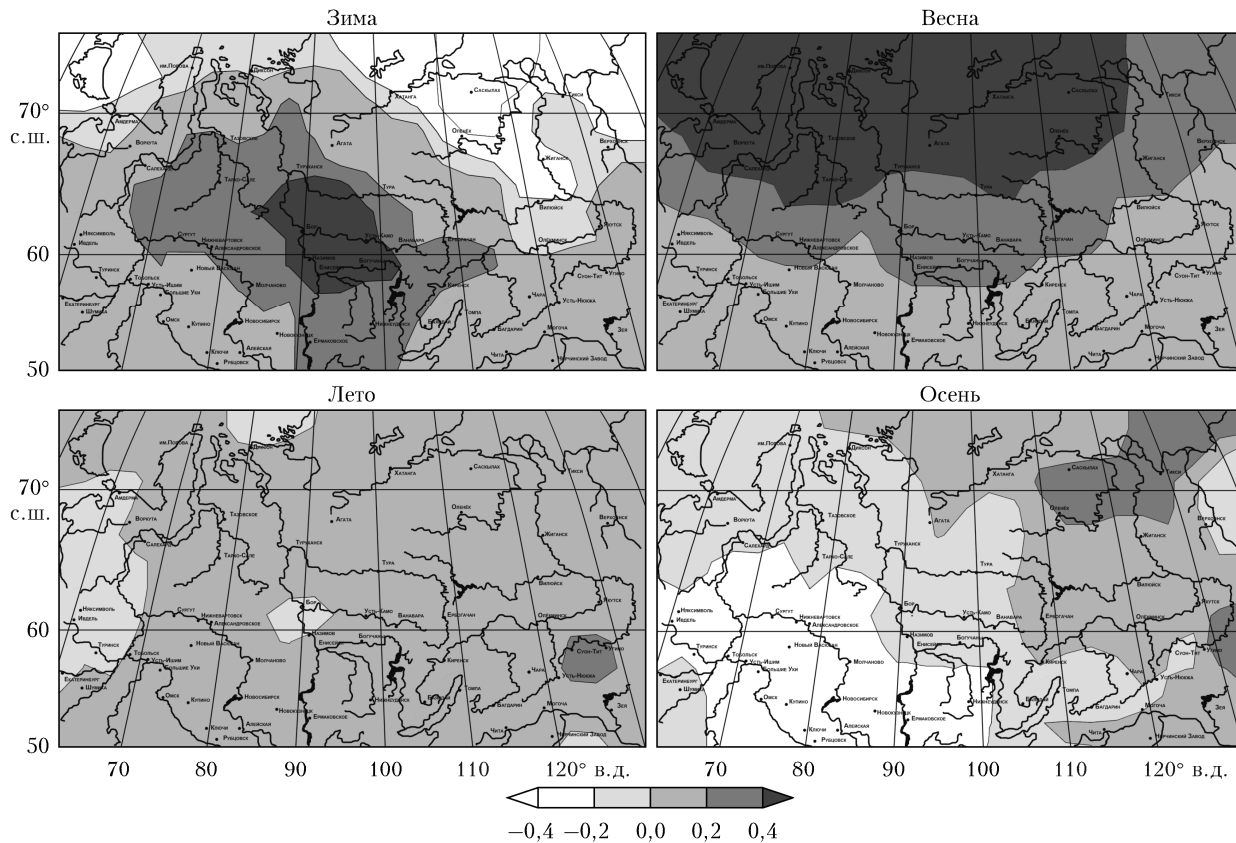


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонной приземной температуры воздуха на территории Сибирского региона за период 2006–2015 гг.

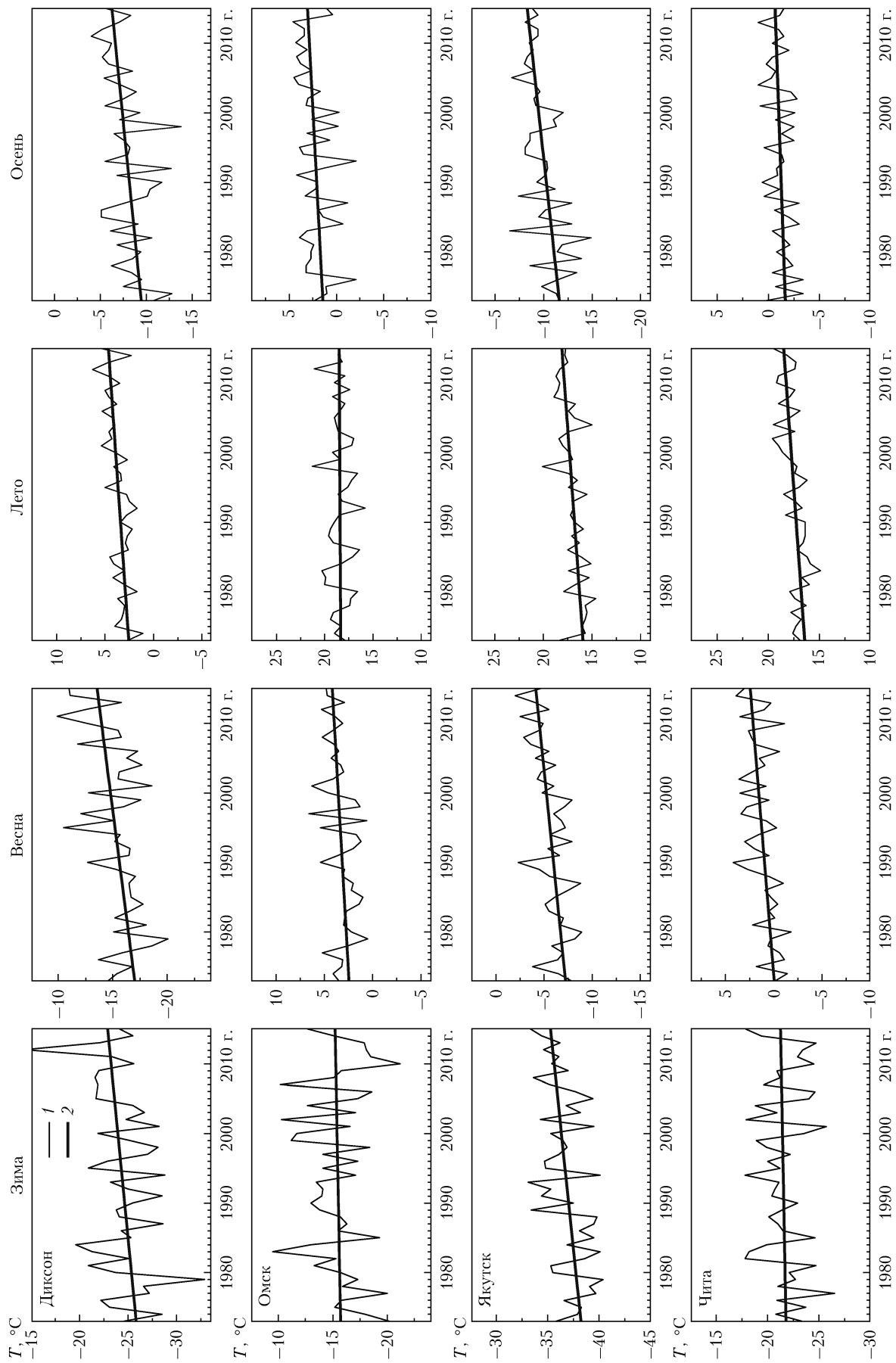


Рис. 4. Долговременные изменения среднесезонной приземной температуры воздуха (1) и их линейные тренды (2) для типичных станций Сибирского региона (Диксон, Омск, Якутск, Чита)

слабое похолодание с интенсивностью не менее $-0,01$ °C/10 лет или потепление с интенсивностью, превышающей $0,05$ °C/10 лет. Заметим, что аналогичные результаты представлены в работе [11] для средних, минимальных и максимальных значений приземной температуры над территорией Канады, которая географически и климатически сопоставима с рассматриваемыми нами районами Западной и Восточной Сибири. В частности, в ней отмечается, что наибольшая интенсивность роста средней температуры наблюдалась зимой и ранней весной и составляла в среднем $0,09$ °C/10 лет. Тем не менее присутствует региональная неравномерность в распределении значений интенсивностей по всей наблюдаемой территории, в том числе присутствуют области с отрицательными трендами [11].

На рис. 3 приводится карта с пространственным распределением интенсивностей линейных трендов среднесезонной приземной температуры воздуха за период с 2006 по 2015 г., когда наблюдалось замедление ее роста. Первое, что необходимо отметить, это крайняя неравномерность в распределении интенсивностей изменения температуры как по сезонам, так и в пространстве. А второе — это существенное увеличение абсолютного значения интенсивности тренда температуры, наблюдаемого за этот период. Конечно, необходимо учесть тот факт, что рассматриваемый период включает всего 10 лет (2006–2015 гг.) и заметно короче, чем рассматриваемый на рис. 2 период (1973–2005 гг.), что несомненно влияет на увеличение амплитуды изменения абсолютной величины наблюдаемой интенсивности изменения температуры.

Из рис. 3 видно, что весной на всей рассматриваемой территории наблюдается положительный тренд изменения приземной температуры воздуха, причем его интенсивность растет монотонно с юга на север и в арктических районах превышает значение $0,40$ °C/10 лет. Напротив, зимой в арктических районах всего Сибирского региона, а осенью над всей территорией Западной Сибири и юго-западом Восточной наблюдаются отрицательные температурные тренды с интенсивностью около $-0,10$ ÷ $-0,30$ °C/10 лет и даже более $-0,40$ °C/10 лет (по абсолютной величине), что связано с замедлением роста потепления в этот период. Хотя тренды температуры за период с 2006 по 2015 г. и изменили знак на отрицательный, общее потепление продолжилось. Летом значительных изменений и отклонений от тенденций, вычисленных для других периодов, не отмечалось: почти на всей рассматриваемой территории тренды среднесезонной приземной температуры воздуха были положительными и не превышали $0,20$ °C/10 лет.

На рис. 4 в качестве примера приведены долговременные изменения среднесезонной приземной температуры воздуха и их линейные тренды за период с 1973 по 2015 г. для четырех сезонов и четырех типичных станций Сибирского региона, представляющих полярные (Диксон), субполярные (Якутск) и умеренные широты (Омск, Чита). Видно, что все

тренды имеют положительный знак. Наибольшая интенсивность тренда и, следовательно, потепления характерна для весеннего сезона для всех выбранных станций. В то время как наибольшая изменчивость среднесезонной приземной температуры воздуха для всех четырех станций наблюдается в зимний сезон, а наименьшая — летом.

Заключение

В работе были проведены исследования интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонной приземной температуры воздуха за период с 1973 по 2015 г. для Сибирского региона. Результаты позволяют сделать вывод о том, что имеет место значительная пространственная, временная и сезонная изменчивость линейных трендов приземной температуры. Особенно эта изменчивость проявляется в последнее десятилетие в течение весеннего и зимнего сезонов и отчасти осеннего. На территории всего Сибирского региона для весны характерна устойчивая положительная тенденция изменения среднесезонной приземной температуры воздуха, абсолютное значение которой растет по направлению с юга на север, и в полярных широтах интенсивность тренда среднесезонной приземной температуры воздуха превышает $0,40$ °C/10 лет, что может быть следствием таяния арктических льдов и общего снижения снегового покрытия рассматриваемой территории. В зимний период, наоборот, в последнее десятилетие в арктических широтах наблюдается снижение темпов потепления, хотя общая положительная тенденция изменения приземной температуры воздуха остается на остальной территории Сибирского региона. В осенний период последнего десятилетия почти на всей территории Западной Сибири и в юго-западной части Восточной Сибири наблюдается заметное похолодание с интенсивностью до $-0,40$ °C/10 лет.

Таким образом, в повышении приземной температуры воздуха над территорией Сибирского региона, наблюдаемом за период с 1973 по 2015 гг., основной вклад давали зимний и весенний сезоны. Климат в Сибири не стал «более жарким», а скорее «менее холодным». Наибольший вклад в понижение интенсивности потепления за последнее десятилетие внесло похолодание относительно предыдущих периодов в зимний сезон в арктических областях Сибири, а также похолодание в осенний сезон на территории Западной Сибири и юго-западной частью Восточной Сибири (Прибайкалье).

1. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* / Eds. S. Solomon et al. N.Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В., Ильин С.Н.* Изменение климатов пограничного слоя атмосферы Сибири в период глобального потепления. Часть 1. Аномалии и тренды температуры воздуха // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 942–951.
3. *Шерстюков Б.С.* Сезонные особенности изменений климата за 1970–2011 гг. // *Анализ изменений клима-*

- та и их последствий. Труды ФГБУ «ВНИИГМИ–МЦД». 2012. Вып. 176. С. 3–12.
4. Шерстюков Б.С. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 294 с.
 5. Liebmann B., Dole R.M., Jones C., Bladé I., Allured D. Influence of choice of time period on global surface temperature trend estimates // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2010. V. 91. P. 1485–1491. DOI: 10.1175/2011BAMS3030.1.
 6. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2d ed. Academic Press, 2006. 627 p.
 7. Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я., Горев Е.В. Долговременные изменения температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири. Часть 1. Изменение среднегодовой температуры // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 684–690.
 8. Жеребцов Г.А., Васильева Л.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Долговременные изменения температуры и теплосодержания тропосферы в XX в. // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 473–478.
 9. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2009. 501 с.
 10. Шерстюков Б.С., Салугашвили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Труды ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Вып. 175. С. 43–51.
 11. Bonsal B.R., Zhang X., Vincent L.A., Hogg W.D. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada // J. Climate. 2001. V. 14. P. 1959–1976.

V.S. Komarov, S.N. Il'in, N.Ya. Lomakina, A.V. Lavrinenko. Linear trends in average seasonal surface air temperature and modern changes in the regional climate of Siberia.

The work presents the results of the study of long-term changes in average seasonal surface air temperature in the Siberian region for the last 43 years (from 1973 to 2015), as well as for the periods from 1973 to 2005 (when there was the most intense global warming) and from 2006 to 2015 (the period of global warming slowdown or even a cooling in some regions). It is shown that winter and spring seasons have made major contribution to the rise in surface air temperature over the territory of Siberia during the period from 1973 to 2015. A cooling in the Arctic regions of Siberia in the winter season, as well as a cooling in the Western Siberia and in the south-western part of Eastern Siberia in the autumn season made the greatest contribution to reducing the intensity of the warming over the last decade.