

Долговременные изменения температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири.

Часть 1. Изменение среднегодовой температуры

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

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 4.04.2011 г.

Обсуждаются результаты анализа трендов долговременных изменений среднегодовой температуры в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за 1981–2010 гг., оцененных по данным наблюдений на 25 аэрологических станциях. Установлено, что на фоне общего для Сибирского региона повышения среднегодовой температуры в субполярных широтах (60–70° с.ш.) Западной Сибири и в прилегающих районах Восточной Сибири наблюдаются ее статистически значимые отрицательные тренды. Показано также, что в последнее 10-летие (2001–2010 гг.) в пограничном слое атмосферы над большей частью Сибирского региона, исключая лишь полярные районы и районы субполярных широт Восточной Сибири, наблюдается заметное похолодание.

Ключевые слова: изменение климата, линейные тренды, среднегодовая температура, пограничный слой атмосферы, регион Сибири; climate change, linear trends, average annual temperature, the atmospheric boundary layer, Siberian region.

Введение

Глобальное потепление, наблюдаемое с середины 70-х гг. XX в., нашло свой заметный отклик и на региональном уровне, не обойдя стороной и территорию Сибири, представляющую собой обширный регион с большим разнообразием физико-географических условий. Поэтому неслучайно, что исследованию особенностей изменения климата на территории Сибирского региона посвящено достаточно большое число публикаций (см., например, [1–8]). Однако, несмотря на многочисленные публикации по проблеме региональных изменений климата Сибири, все они содержат результаты исследования подобных изменений в основном вблизи земной поверхности, в меньшей степени в свободной атмосфере и совершенно не охватывают пограничный слой атмосферы (ПСА), в котором также должны отмечаться долгопериодные тренды, связанные с процессами глобального потепления. С учетом этого, оценка происходящих долговременных изменений температурного режима пограничного слоя атмосферы над территорией Сибирского региона имеет важное значение для получения более полной картины изменения компонентов климатической системы на региональном уровне.

Действительно, первые исследования, проведенные по данной проблеме применительно к пограничному слою атмосферы [9], показали, что глобальное

потепление, наблюдаемое в настоящее время, проявляется в этом слое по-разному в различных физико-географических районах Сибири и в значительной степени зависит от широтного положения станции. В частности, установлено, что если в январе в полярных районах Сибирского региона и на территории Восточной Сибири (южнее 60° с.ш.) во всем ПСА преобладают положительные тренды температуры, то на юге Западной Сибири отмечаются ее отрицательные тренды. В то же время в июле в пограничном слое атмосферы наблюдается повсеместное преобладание положительных трендов среднемесячной температуры.

Однако сведения, приведенные в [9], являются предварительными, поскольку они получены по данным только 10 аэрологических станций. К тому же в [9] не рассматриваются особенности долгопериодных изменений среднегодовой и среднесезонной температуры (в том числе в переходные сезоны), как это принято в соответствующей литературе.

Все это было учтено авторами при дальнейших исследованиях, проведенных по поставленной проблеме, результаты которых и излагаются в настоящей статье.

1. Исходные данные и некоторые методические аспекты их обработки

Основным исходным материалом, использованным для формирования рядов статистических совокупностей температуры и решения поставленной проблемы, послужили данные многолетних (1973–2010 гг.) двухразовых (00 и 12 ч GMT) ра-

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

диозондовых наблюдений (<http://www.weather.uwo.edu/>) на 25 аэрологических станциях, сгруппированных на территориях Западной и Восточной Сибири с учетом их широтного положения, а именно:

в Западной Сибири:

- полярные широты (70–75° с.ш.), Диксон;
- субполярные широты (60–70° с.ш.), Салехард, Туруханск, Александровское, Бор;

- умеренные широты (50–60° с.ш.), Верхнее Дуброво, Тобольск, Омск, Новосибирск, Енисейск;

в Восточной Сибири:

- полярные широты (70–75° с.ш.), Хатанга, Тикси;

- субполярные широты (60–70° с.ш.), Тура, Оленек, Жиганск, Якутск, Олекминск, Верхоянск, Вилюйск, Ванавара;

- умеренные широты (50–60° с.ш.), Киренск, Чара, Нижнеудинск, Багдарин, Чита.

Обработка данных аэрологических наблюдений проводилась с помощью специализированной Информационно-вычислительной системы «Метео» [10]. Следует отметить, что все исходные данные, представленные на главных изобарических поверхностях: 1000, 925 (при наличии), 850 и 700 гПа и уровнях особых точек, были предварительно приведены (с помощью процедуры линейной интерполяции) к системе геометрических высот: 0 (уровень земной поверхности), 400, 800 и 1600 м.

Рассмотрим особенности методологии статистической обработки первичной информации, результаты которой использованы для анализа долгопериодных изменений температуры воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона. В качестве анализируемых параметров использованы среднегодовые и среднесезонные аномалии температуры $\Delta\bar{T} = \bar{T}_i - \bar{T}$ (здесь \bar{T}_i – среднегодовые или среднесезонные значения i -го года, \bar{T} – соответствующая норма, °С, полученная для базового периода). При этом для оценки аномалий в качестве базового периода взяты 1973–1980 гг., когда, согласно [11], на территории Северного полушария не наблюдались какие-либо значимые изменения среднегодовой температуры. Кроме того, для исследования тенденций межгодовых изменений среднегодовых и среднесезонных аномалий температуры использованы линейные тренды, а также значения интенсивности (скорости) изменения осредненной температуры (°С/10 лет) в целом за последние 30 (1980–2010 гг.) и 10 лет (2001–2010 гг.), поскольку, согласно [11], в это 10-летие на фоне глобального потепления выявлена определенная тенденция к уменьшению интенсивности подобного потепления после 2005 г. – года максимума среднегодовой температуры на отрезке времени 1850–2008 гг.

2. Аномалии и линейные тренды изменения среднегодовой температуры

Одной из первых задач исследования отклика регионального климата Сибири на глобальное потепление является анализ аномалий и линейных трендов долгопериодных изменений среднегодовой температуры за последние 30 лет. С этой целью воспользуемся рис. 1–3, на которых приведены для шести типичных станций (Диксон, Тикси, Салехард, Якутск, Омск и Чита, представляющих полярную, субполярную и умеренные зоны Сибири) значения аномалий (по отношению к базовому периоду 1973–1980 гг.) и линейные тренды изменения среднегодовой температуры на четырех высотных уровнях (земля, 400, 800, 1600 м), а также табл. 1, содержащей для всех рассматриваемых станций данные об интенсивности изменения той же температуры (°С/10 лет) за весь 30-летний период (1981–2010 гг.).

Таблица 1
Интенсивность изменения среднегодовой температуры (°С/10 лет) в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за 1981–2010 гг.

Станция	Высота, м			
	0	400	800	1600
Западная Сибирь				
<i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i>				
Диксон	0,53	0,39	0,29	0,12
<i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Салехард	–0,08	–0,06	–0,08	–0,08
Туруханск	–0,07	–0,08	–0,04	–0,12
Александровское	–0,19	–0,16	–0,05	–0,15
Бор	–0,26	–0,10	–0,08	–0,20
<i>Умеренные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Верхнее Дуброво	0,18	0,34	0,36	0,35
Тобольск	0,00	0,07	0,11	0,08
Омск	0,12	0,17	0,09	0,03
Новосибирск	0,11	0,15	0,16	0,05
Енисейск	0,01	0,14	0,16	0,09
Восточная Сибирь				
<i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i>				
Хатанга	0,19	0,21	0,16	0,12
Тикси	0,39	0,49	0,48	0,40
<i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Тура	–0,07	–0,09	–0,09	–0,09
Оленек	0,48	0,25	0,31	0,24
Жиганск	0,19	0,26	0,39	0,31
Якутск	0,73	0,41	0,43	0,43
Олекминск	0,12	0,20	0,33	0,23
Верхоянск	0,22	0,16	0,28	0,18
Вилюйск	0,41	0,38	0,41	0,27
Ванавара	–0,08	–0,03	–0,01	–0,01
<i>Умеренные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Киренск	0,11	0,26	0,29	0,23
Чара	0,12	0,09	0,00	0,02
Нижнеудинск	0,02	0,07	0,03	0,05
Багдарин	0,12	0,04	0,07	0,19
Чита	0,46	0,35	0,25	0,17

Анализ рис. 1–3 и данных табл. 1, а также всего имеющегося статистического материала показал, что характер трендов аномалий среднегодовой температуры, полученных для пограничного слоя атмосферы Сибирского региона по данным последнего

30-летия, является неоднородным по пространству. В частности, установлено, что:

– в полярных широтах Сибирского региона (70–75° с.ш.) и особенно на его арктическом побережье (ст. Диксон и Тикси) наблюдаются на всех высотах ПСА значительные (0,29–0,53 °C/10 лет) положительные тренды среднегодовой температуры, что говорит о существенном потеплении климата в этих широтах во всем пограничном слое атмосферы;

– в субполярных широтах того же региона (60–70° с.ш.) отмечается совершенно иная картина, а именно: если в пределах этих широт на территории Западной Сибири (ст. Салехард, Туруханск, Александровское и Бор), а также в прилегающих районах Восточной Сибири (ст. Тура и Ванавара) во всем ПСА отмечаются отрицательные, хотя и незначительные тренды среднегодовой температуры (от –0,04 до –0,26 °C/10 лет), то на остальной

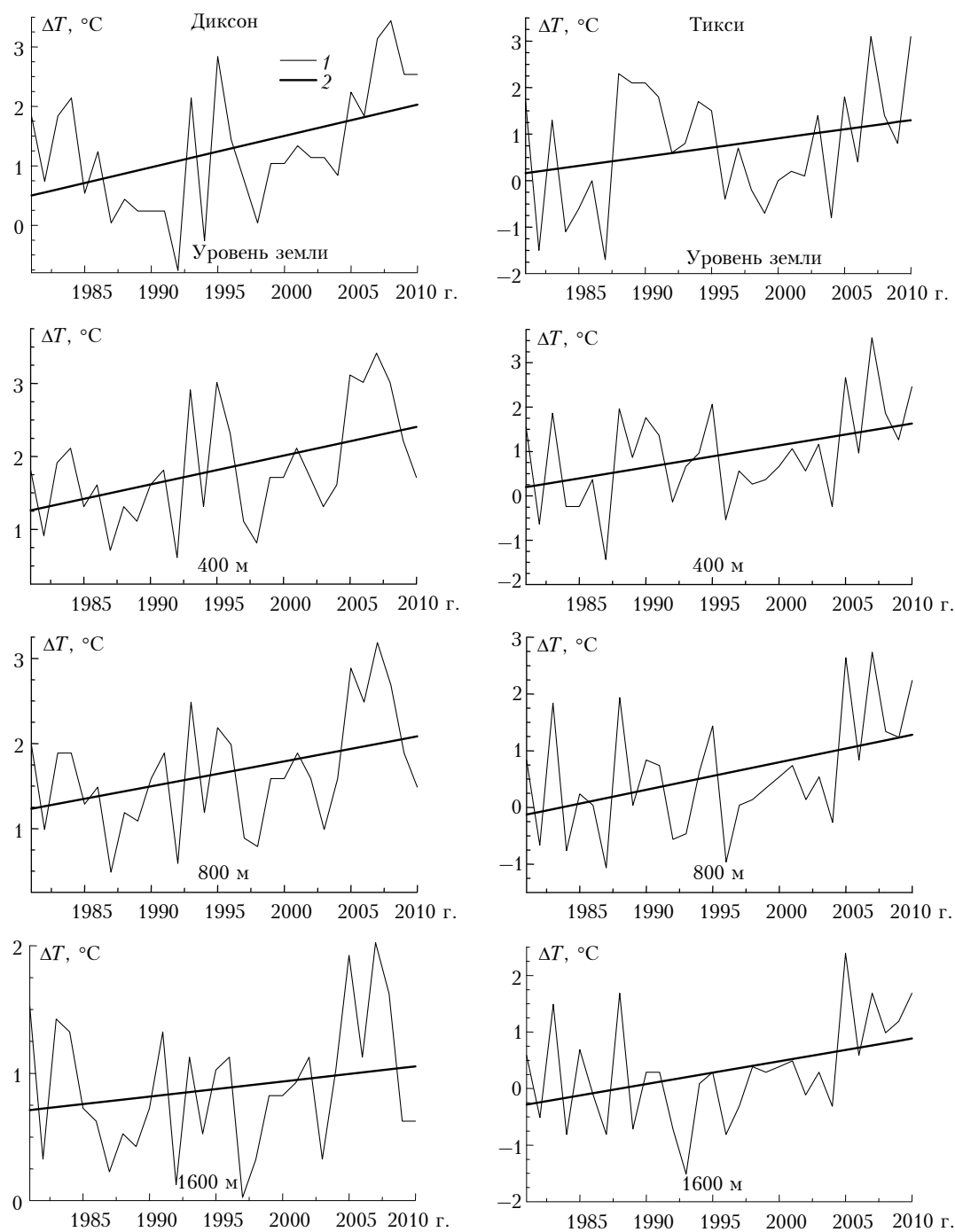


Рис. 1. Долговременные изменения аномалий среднегодовой температуры (1) и их линейные тренды (2) в пограничном слое атмосферы для ст. Диксон и Тикси

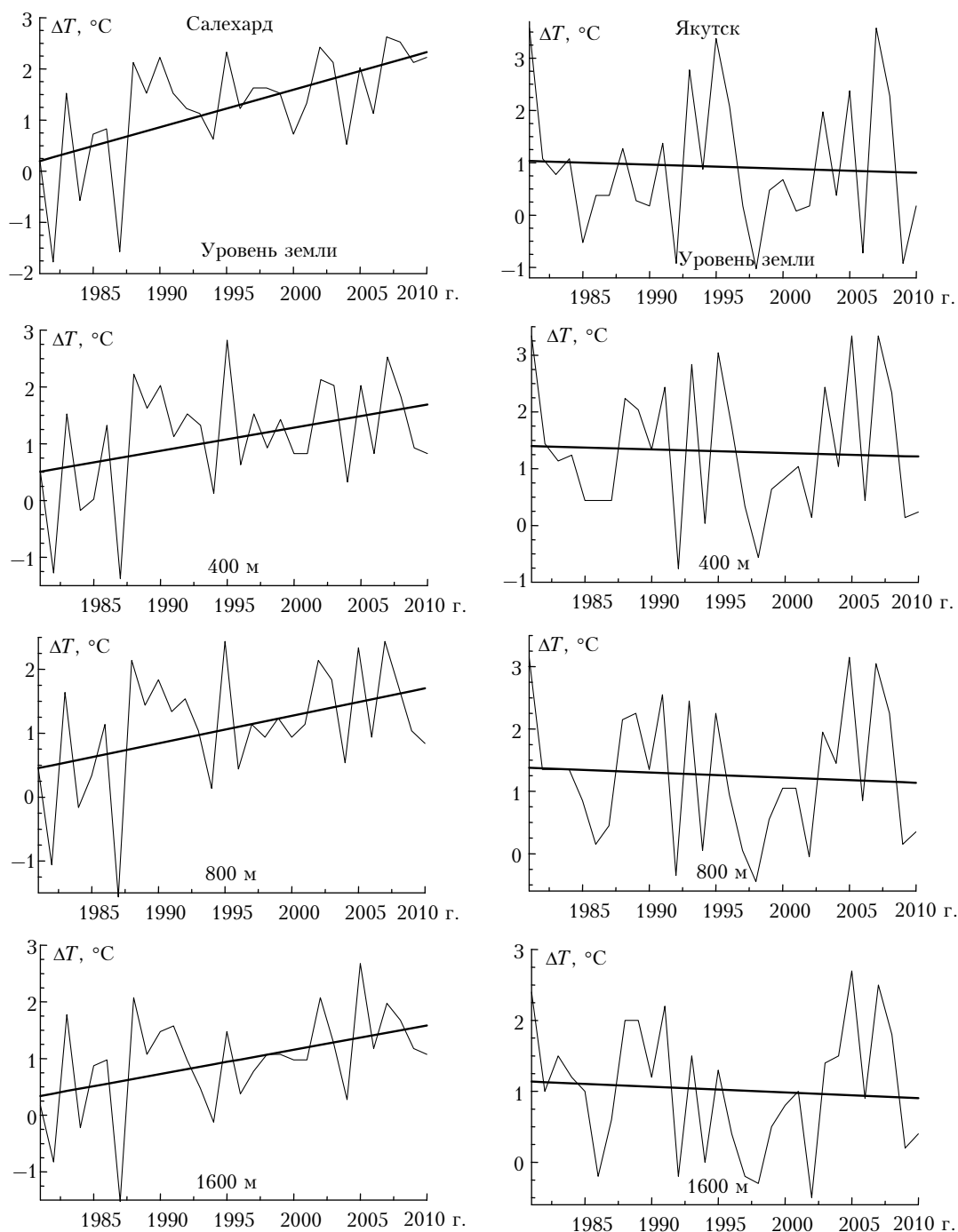


Рис. 2. Долговременные изменения аномалий среднегодовой температуры (1) и их линейные тренды (2) в пограничном слое атмосферы для ст. Салехард и Якутск

территории Восточной Сибири имеют место существенные и статистически значимые положительные тренды (порядка 0,20–0,43 °C/10 лет), причем их максимальные значения наблюдаются в районе ст. Якутск, где они варьируют от 0,73 °C/10 лет вблизи земной поверхности до 0,41–0,43 °C/10 лет в слое 400–1600 м;

– и наконец, в умеренных широтах Сибирского региона (50–60° с.ш.) во всем пограничном слое атмосферы преобладают практически повсеместно

слабые положительные тренды (около 0,10–0,20 °C/10 лет). Исключением являются лишь тренды, полученные для ст. Верхнее Дуброво и Чита, где они достигают 0,35–0,46 °C/10 лет. При этом на юге Западной Сибири (ст. Омск и Новосибирск) повышение среднегодовой температуры вблизи земной поверхности существенно меньше (порядка 0,11–0,12 °C/10 лет), чем это следует из работы [5], согласно которой подобное повышение может доходить здесь до 0,40 °C/10 лет.

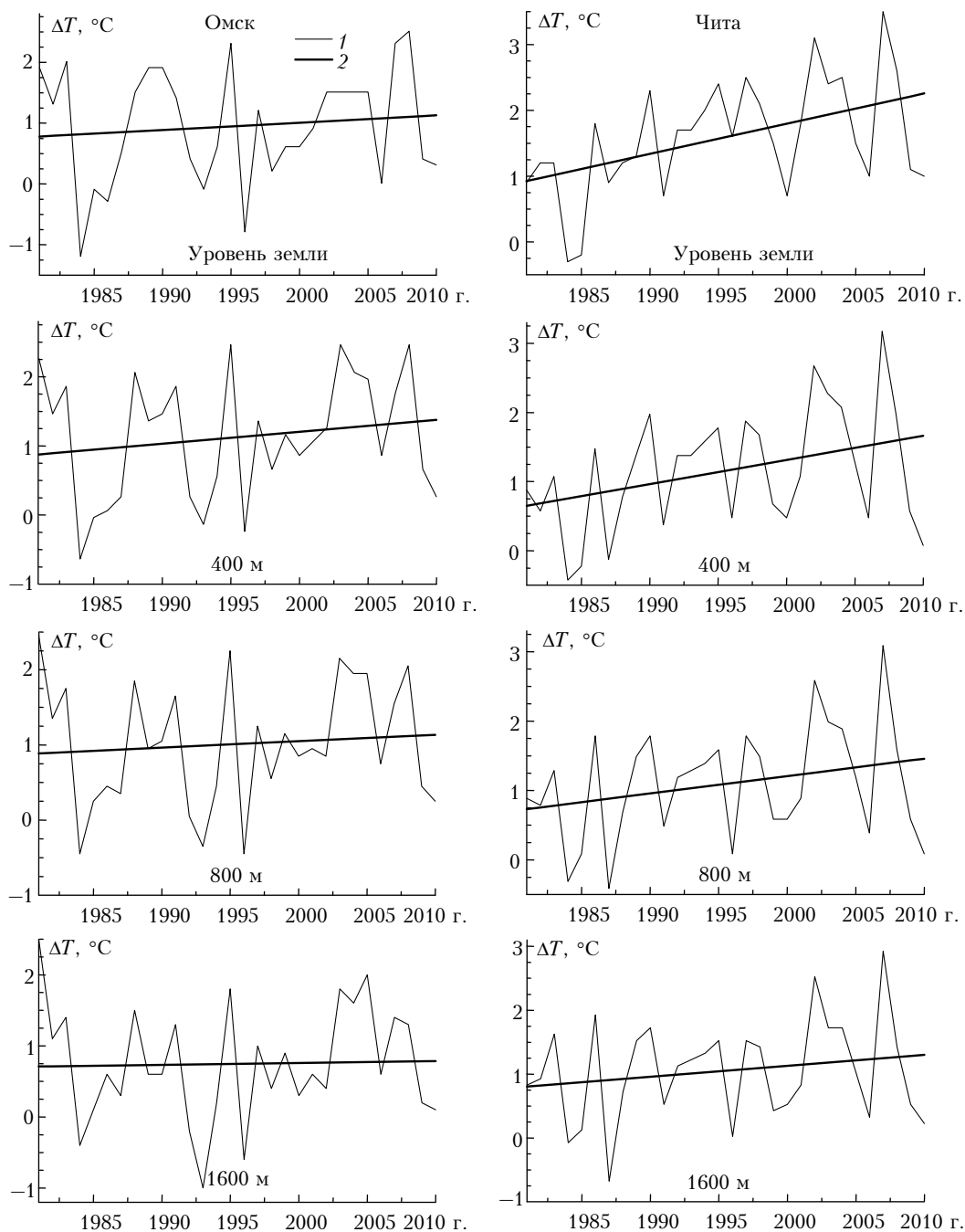


Рис. 3. Долговременные изменения аномалий среднегодовой температуры (1) и их линейные тренды (2) в пограничном слое атмосферы для ст. Омск и Чита

3. Интенсивность изменения среднегодовой температуры в последнее десятилетие

В работе [11], как уже говорилось выше, показано, что среднегодовая температура, осредненная по всему Северному полушарию, достигла своего максимума (15,20 °С) в 2005 г., а затем понизилась к 2008 г. до 15,07 °С. С учетом этого представляет большой интерес оценка регионального отклика на

данное явление, проведенная для пограничного слоя атмосферы на примере Сибирского региона. С этой целью воспользуемся табл. 2, содержащей для отдельных высотных уровней ПСА значения интенсивности изменения среднегодовой температуры (°С/10 лет), рассчитанные для последнего 10-летия, когда проявилась тенденция к понижению среднегодовой температуры Северного полушария.

Анализ табл. 2 показывает, что интенсивность изменения среднегодовой температуры, оцененная интегрально (т.е. для всего 30-летнего периода,

с 1981 по 2010 г.), и интенсивность изменения той же температуры за последнее десятилетие существенно зависят от географического положения аэрологической станции и имеют в различных районах Сибири разные по характеру отклики на глобальное потепление.

Таблица 2

Интенсивность изменения среднегодовой температуры (°С/10 лет) в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за 2001–2010 гг.

Станция	Высота, м			
	0	400	800	1600
Западная Сибирь				
<i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i>				
Диксон	2,34	0,83	0,69	0,15
<i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Салехард	–0,07	–0,22	–0,05	–0,16
Туруханск	–0,01	–0,44	–0,35	–0,42
Александровское	–0,76	–1,07	–0,79	–0,87
Бор	–0,33	–1,30	–0,76	–0,92
<i>Умеренные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Верхнее Дуброво	0,15	0,81	1,25	1,46
Тобольск	–0,16	–0,22	–0,42	–0,43
Омск	–0,44	–0,81	–0,73	–0,63
Новосибирск	–0,93	–1,00	–0,79	–0,61
Енисейск	–0,65	–1,52	–1,35	–1,11
Восточная Сибирь				
<i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i>				
Хатанга	1,63	0,82	0,48	0,13
Тикси	2,50	1,86	1,96	1,67
<i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Тура	–0,68	–1,33	–0,50	–0,49
Оленек	0,28	0,04	0,26	0,10
Жиганск	0,92	0,85	0,95	0,90
Якутск	0,81	0,24	0,40	0,01
Олекминск	0,06	0,03	0,27	0,27
Верхоянск	2,33	0,33	0,36	1,07
Вилуйск	1,06	0,79	0,87	0,74
Ванавара	–1,42	–1,05	–1,12	–0,91
<i>Умеренные широты (60–70° с.ш.)</i>				
Киренск	–2,01	–1,75	–1,25	–1,10
Чара	–0,02	–0,44	–0,46	–0,18
Нижнеудинск	–0,96	–1,66	–1,27	–1,10
Багарин	–0,75	–0,25	–0,13	–0,27
Чита	–1,07	–1,38	–1,24	–1,09

В частности, из данных табл. 2 и другого имеющегося статистического материала следует, что:

– в полярных широтах Сибирского региона (ст. Диксон, Хатанга, Тикси) в последнее 10-летие повсеместно отмечалась наибольшая (за весь рассматриваемый 30-летний период) интенсивность повышения среднегодовой температуры, особенно вблизи земной поверхности (здесь ее значения варьируют в пределах 1,63–2,50 °С/10 лет), причем с высотой интенсивность повышения той же температуры существенно уменьшается, особенно в районах ст. Диксон и Хатанга, где ее значения на верхней границе ПСА (1600 м) составляют всего 0,13–0,15 °С/10 лет;

– в субполярных широтах Сибирского региона отмечается совершенно иная картина: если в последнее 10-летие на этих широтах в Западной Сибири (ст. Салехард, Туруханск, Александровское и Бор), а также в прилегающих районах Восточной Сибири (ст. Тура и Ванавара) во всем пограничном слое атмосферы наблюдалось существенное понижение среднегодовой температуры (интенсивность этого понижения может достигать в некоторых случаях от –0,70 до –1,42 °С/10 лет), то на остальной территории Восточной Сибири – повышение, хотя и с различной степенью интенсивности в разных районах и на различных высотах;

– и наконец, в умеренных широтах рассматриваемого региона во всем пограничном слое атмосферы за последнее 10-летие наблюдалось существенное похолодание, интенсивность которого на некоторых высотах и станциях (например в районе ст. Нижнеудинск и Киренск) достигала –1,70 ... –2,00 °С/10 лет. Лишь вблизи западной границы территории Западной Сибири (ст. Верхнее Дуброво) отмечалось заметное потепление, наблюдаемое на всех рассматриваемых высотах ПСА и связанное с влиянием области интенсивного и статистически значимого повышения среднегодовой температуры, расположенной, согласно [5], в прилегающих районах европейской территории России.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что над большей частью Сибирского региона в пограничном слое атмосферы преобладает в последнем десятилетии заметное похолодание, а это на региональном уровне подтверждает сделанный в [11] вывод о наблюдаемом с 2006 г. ослаблении интенсивности глобального потепления.

Заключение

Проведенный анализ особенностей долговременных изменений среднегодовой температуры в пограничном слое атмосферы Сибирского региона позволил установить, что на фоне глобального потепления на территории данного региона отклик на это потепление проявляется по-разному в зависимости от географического положения станции. Так, если в полярных (70–75° с.ш.) и умеренных (50–60° с.ш.) широтах Сибири на всех высотах пограничного слоя атмосферы и повсеместно преобладают положительные тренды среднегодовой температуры, то в субполярных (60–70° с.ш.) широтах этого региона положительные тренды в ПСА наблюдаются лишь над территорией Восточной Сибири, поскольку на тех же широтах Западной Сибири (и даже в прилегающих районах Восточной Сибири) отмечаются ее статистически значимые отрицательные тренды.

Кроме того, анализ изменений среднегодовой температуры за последнее десятилетие (2001–2010 гг.) показал, что в пограничном слое атмосферы над большей частью Сибирского региона (исключая лишь его полярные широты и районы Восточной Сибири, находящиеся в области субполярных широт) отмечается заметное похолодание.

1. *Караханян А.А.* Долговременные изменения атмосферной циркуляции и климата на территории Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 12. С. 1104–1106.
2. *Дюкарев Е.А., Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В.* Изменение климата на азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений и реанализа // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 11. С. 934–940.
3. *Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В.* Пространственные и временные масштабы наблюдаемого потепления в Сибири // *Докл. РАН.* 2007. Т. 412, № 6. С. 814–817.
4. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* Т. 1. Изменение климата. М.: Росгидромет, 2008. 277 с.
5. *Шерстюков А.Б.* Изменение климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. 127 с.
6. *Кабанов М.В.* Сезонные закономерности наблюдаемого потепления в Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 1. С. 7–10.
7. *Горбатенко В.П., Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Поднебесных Н.В., Харюткина С.В.* Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 1. С. 15–21.
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. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В., Ильин С.Н.* Изменение климата в пограничном слое атмосферы Сибири в период глобального потепления. Часть 1. Аномалии и тренды температуры воздуха // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 11. С. 942–950.
10. *Комаров В.С., Горев Е.В., Богушевич А.Я., Лавриненко А.В.* Информационно-вычислительная система «Метео» для метеорологической поддержки прикладных задач. Часть 1. Основные функции и структура системы // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 7. С. 654–660.
11. *Переведенцев Ю.П.* Теория климата. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2009. 504 с.

V.S. Komarov, A.V. Lavrinenko, S.N. Il'in, N.Ya. Lomakina, E.V. Gorev. **Long-term changes of temperature within the atmospheric boundary layer of Siberia. Part 1. Changes of average annual temperature.**

The analysis results of the long-term change trends of average annual temperature within the atmospheric boundary layer of Siberian region over 1981–2010 estimated by the observed data of 25 aerological stations are discussed. It has been found that the statistically significant negative trends are observed in the subpolar latitudes (60–70N) of Western Siberia and the adjoining regions of Eastern Siberia against the background of general rising of average annual temperature for Siberian region. It is shown that over the last ten years (2001–2010) the appreciable fall of temperature predominates in the atmospheric boundary layer of the most part of Siberia with the exception of the polar regions and the subpolar latitude areas of Eastern Siberia.