

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.583

Современные тенденции изменения температуры пограничного слоя атмосферы Сибирского региона

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 8.07.2021 г.

Обсуждаются результаты анализа трендов долговременных изменений среднегодовой и среднесезонной температуры в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за 1981–2020 гг. для зимы, весны, лета, осени и в целом за год по данным наблюдений 24 аэрологических станций. Установлено, что за исследуемый 40-летний период во всем пограничном слое атмосферы Сибири наблюдаются статистически значимые положительные тренды среднегодовой температуры воздуха, при этом величина тренда уменьшается с севера на юг и с высотой. Главный вклад в региональное потепление климата пограничного слоя атмосферы Сибири вносят весна, лето и осень, причем потепление пограничного слоя усилилось в последнее десятилетие (2011–2020 гг.).

Ключевые слова: глобальное потепление, температура воздуха, линейные тренды, пограничный слой атмосферы, Сибирский регион; *global warming, air temperature, linear trends, the atmospheric boundary layer, Siberia region.*

Введение

Современное глобальное потепление, наблюдаемое с середины 1970-х гг., не обошло стороной и Сибирь, которая представляет собой обширный регион с большим разнообразием физико-географических условий. Исследованию особенностей изменения климата на территории Сибирского региона посвящено достаточно большое число публикаций (например, [1–23]). Однако все они содержат результаты исследования тенденций изменения температуры воздуха в основном вблизи земной поверхности, в меньшей степени – в свободной атмосфере, и почти не охватывают пограничный слой атмосферы (ПСА), где также должны отмечаться долгопериодные тренды, связанные с процессами глобального потепления. Поэтому оценка долговременных изменений температурного режима ПСА Сибири имеет важное значение для получения более полной картины изменения компонентов климатической системы на региональном уровне, а также при решении многих прикладных задач дистанционного оптического зондирования атмосферы [24, 25].

В условиях современного глобального потепления наряду с исследованием долговременных изменений среднегодовой температуры воздуха в ПСА несомненный интерес представляет изучение изме-

нений среднесезонной температуры для оценки непосредственного вклада каждого из сезонов в потепление климата планеты и ее отдельных регионов. Согласно [15, 20–22] основной вклад в темпы повышения среднегодовой температуры на территории Сибири с 1970-х гг. вносили изменения среднесезонной температуры зимой. Глобальное потепление атмосферы проявляется по-разному в различных регионах. В частности, в районе Томска скорость потепления наименьшая зимой, а наибольшая весной и летом (1996–2016 гг.) [23]. Осенью в 1996–2005 гг. величина линейного тренда составляла $3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а в 2006–2016 гг. наметился отрицательный тренд изменения температуры ($-3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). Кроме того, было выявлено начавшееся с 2006 г. понижение среднегодовой температуры в Северном полушарии [5], в частности в Сибирском регионе [15, 19–22, 26, 27], и потому имеет значение оценка вклада среднесезонной температуры того или иного сезона в темпы повышения (или понижения) среднегодовой температуры ПСА в различных районах. Стоит отметить, что анализ линейных трендов температуры воздуха даже на достаточно больших интервалах времени (1981–2020 гг.) может не давать объективной картины реальных изменений [7], и требуются дополнительные, более тщательные исследования.

Предыдущие исследования вышеописанной проблемы [26–29] показали, что с 1981 по 2010 г. глобальное потепление проявляется по-разному в ПСА в различных физико-географических районах Сибири и наиболее сильно это проявление зависит

* Наталья Яковлевна Ломакина (lnya@iao.ru); Андрей Викторович Лавриненко (andrey80@yandex.ru).

от широты расположения станции. Так, в полярных (70–75° с.ш.) и умеренных (50–60° с.ш.) широтах Сибири на всех высотах ПСА преобладают положительные тренды среднегодовой температуры, а в субполярных (60–70° с.ш.) широтах положительные тренды в ПСА наблюдаются лишь над территорией Восточной Сибири. В субполярных широтах Западной Сибири (и в прилегающих районах Восточной Сибири) отмечаются статистически незначимые отрицательные тренды среднегодовой температуры. Анализ изменений среднегодовой температуры с 2001 по 2010 г. [27, 29] показал, что в ПСА над большей частью Сибирского региона, исключая лишь его полярные широты и районы Восточной Сибири, находящиеся в области субполярных широт, преобладает заметное похолодание.

В [30] проведен анализ трендов среднемесячной температуры в ПСА за январь и июль по наблюдениям 10 аэрологических станций Сибири в период 1981–2020 гг., который показал, что по сравнению с ранее исследуемым периодом (до 2010 г.) [26] в температурном режиме ПСА наблюдаются существенные изменения, и поэтому возникает необходимость продолжения исследований по данным большого количества станций.

Настоящая работа продолжает исследования долговременных изменений среднегодовой и средне-сезонной температуры воздуха ПСА Сибирского региона [27–29], при этом период наблюдений увеличился на 10 лет.

1. Исходные данные

Основным исходным материалом, как и в [27–29], послужили данные многолетних (1973–2020 гг.) двухразовых (00:00 и 12:00 GMT) радиозондовых наблюдений (<http://www.weather.uwyo.edu/>) 24 аэрологических станций, расположенных в различных широтных зонах Сибирского региона. В Западной Сибири полярные широты (70–75° с.ш.) представлены ст. Диксон; субполярные (60–70° с.ш.) – ст. Салехард, Туруханск, Александровское, Бор; умеренные (50–60° с.ш.) – ст. Верхнее Дуброво, Тобольск, Омск, Новосибирск, Енисейск. В Восточной Сибири полярные широты представляет ст. Тикси; субполярные – ст. Тура, Оленек, Жиганск, Якутск, Верхоянск, Вилюйск, Ванавара; умеренные широты – ст. Киренск, Чара, Нижнеудинск, Багдарин, Чита, Алдан. Все исходные данные, измеренные на главных изобарических поверхностях и уровнях особых точек, были предварительно приведены с использованием процедуры линейной интерполяции к системе геометрических высот: 0 (уровень земной поверхности), 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м.

Для анализа долгопериодных изменений температуры ПСА Сибирского региона нами были использованы среднегодовые (среднесезонные) аномалии температуры $\Delta T = \bar{T}_i - \bar{T}$ (здесь \bar{T}_i – среднегодовые (среднесезонные) значения i -го года; \bar{T} –

соответствующая норма в °С, полученная для базового периода). При этом для оценки аномалий в качестве базового периода взяты 1973–1980 гг., когда, согласно [5], на территории Северного полушария не наблюдались значимые изменения среднегодовой температуры. Также для анализа были использованы линейные тренды температуры воздуха (°С/10 лет), рассчитанные по осредненным за сезоны и года наблюдениям на интервале 1981–2020 гг. Все перечисленные климатические характеристики были рассчитаны для четырех уровней пограничного слоя атмосферы (0, 400, 800 и 1600 м) для всех 24 станций исследуемого региона.

Для наглядности представления результатов анализа наряду с таблицами использованы также картографические изображения пространственного распределения коэффициентов линейных трендов, методика построения которых описана в [28].

2. Изменения среднегодовой температуры

Рассмотрим аномалии и линейные тренды долговременных изменений среднегодовой температуры ПСА за последние 40 лет. На рис. 1 дано пространственное распределение по территории Сибирского региона коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры на четырех высотных уровнях (0, 400, 800 и 1600 м). Кроме того, в табл. 1 для ряда станций Сибири в качестве примера представлены значения коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры воздуха на различных высотах ПСА с 1981 по 2020 г.

Проведенный анализ показал, что за последние 40 лет во всем ПСА Сибирского региона наблюдается тенденция увеличения среднегодовой температуры воздуха (рис. 1). При этом наибольшие коэффициенты положительных трендов среднегодовой температуры воздуха (табл. 1) наблюдаются в полярных широтах на уровне земной поверхности (до 0,71–1,00 °С/10 лет). Также высокие значения трендов температуры воздуха (0,65–0,78 °С/10 лет) отмечаются на уровне земной поверхности в центральных районах Якутии (Восточная Сибирь). Тренды среднегодовой температуры ПСА уменьшаются по территории Сибири в направлении с севера на юг до 0,03–0,17 °С/10 лет.

Кроме того, значения коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры воздуха убывают с высотой во всем ПСА (табл. 1). Так, величина тренда у земной поверхности в полярных широтах составляет 0,71–1,00 °С/10 лет, а на высоте 1600 м уменьшается до 0,41–0,57 °С/10 лет. В субполярных широтах коэффициенты тренда также уменьшаются с высотой, причем наиболее ярко это выражено в Восточной Сибири, где значения изменяются от 0,65–78 до 0,28–0,34 °С/10 лет. В умеренных широтах величина тренда слабо убывает или мало изменяется с высотой.

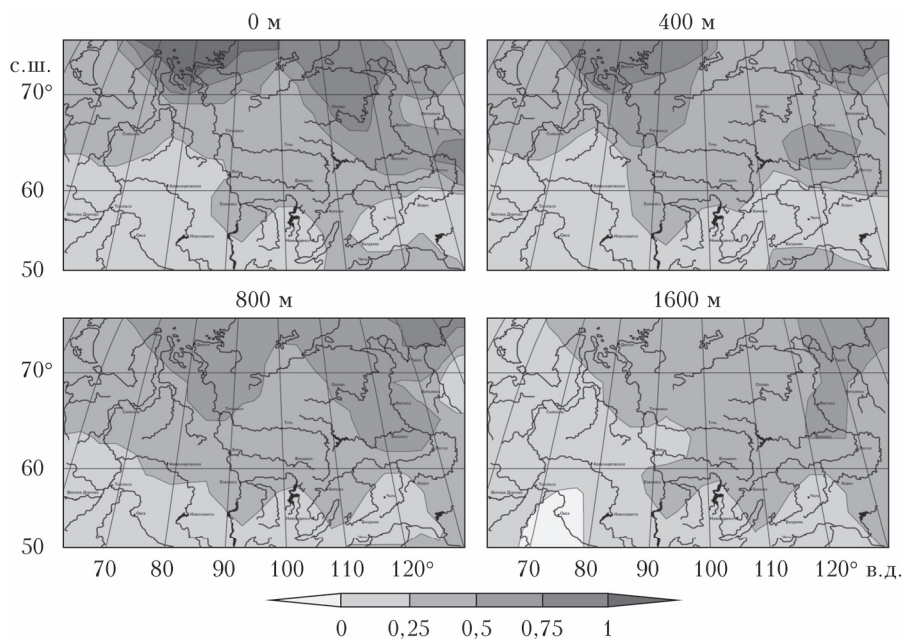


Рис. 1. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) ПСА Сибирского региона

Таблица 1

Коэффициенты линейных трендов среднегодовой температуры ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) ПСА за период 1981–2020 гг. для типичных станций Сибирского региона (подчеркнуты статистически значимые коэффициенты по критерию t -Стьюдента, уровень значимости $\alpha = 0,1$)

| Станция | Высота, м | | | | Станция | Высота, м | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0 | 400 | 800 | 1600 | | 0 | 400 | 800 | 1600 |
| Западная Сибирь | | | | | Восточная Сибирь | | | | |
| <i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Диксон | <u>1,00</u> | <u>0,89</u> | <u>0,68</u> | <u>0,41</u> | Тикси | <u>0,71</u> | <u>0,80</u> | <u>0,74</u> | <u>0,57</u> |
| <i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Салехард | <u>0,48</u> | <u>0,32</u> | <u>0,31</u> | 0,21 | Тура | <u>0,45</u> | <u>0,32</u> | <u>0,42</u> | <u>0,38</u> |
| Туруханск | <u>0,49</u> | <u>0,57</u> | <u>0,51</u> | <u>0,31</u> | Оленек | <u>0,78</u> | <u>0,42</u> | <u>0,51</u> | <u>0,44</u> |
| Александровское | 0,21 | 0,17 | <u>0,28</u> | 0,19 | Верхоянск | <u>0,29</u> | <u>0,24</u> | 0,01 | 0,35 |
| Бор | 0,26 | <u>0,39</u> | <u>0,35</u> | 0,17 | Якутск | <u>0,78</u> | <u>0,32</u> | <u>0,36</u> | <u>0,34</u> |
| <i>Умеренные широты (50–60° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Тобольск | 0,17 | 0,21 | 0,23 | 0,14 | Нижнеудинск | 0,17 | 0,06 | 0,17 | 0,18 |
| Омск | 0,03 | 0,02 | 0,02 | -0,06 | Киренск | <u>0,35</u> | <u>0,21</u> | <u>0,37</u> | <u>0,45</u> |
| Новосибирск | 0,26 | 0,25 | 0,23 | 0,14 | Чита | <u>0,51</u> | <u>0,32</u> | <u>0,27</u> | <u>0,22</u> |

3. Изменения среднегодовой температуры за 2011–2020 гг.

Рассмотрим характер изменения среднегодовой температуры в пограничном слое атмосферы за последнее десятилетие. В табл. 2 для некоторых станций Сибирского региона в качестве примера представлены коэффициенты линейных трендов среднегодовой температуры воздуха ПСА за 30-летний период (1981–2010 гг.), исследуемый в [27, 28], и за последние 10 лет (2011–2020 гг.).

По сравнению с периодом 1981–2010 гг. тенденция изменения среднегодовой температуры ПСА за период 1981–2020 гг. существенно изменилась. В 1981–2010 гг. положительные тренды среднегодо-

вой температуры преобладали (табл. 2) в полярных, субполярных и умеренных широтах Восточной Сибири во всем ПСА. А незначительные положительные и отрицательные тренды наблюдались в субполярных и умеренных широтах Западной Сибири и в прилегающих районах Восточной Сибири. Если рассматривать тренды за последние 40 лет, с 1981 по 2020 г., то заметен рост положительных статистически значимых трендов среднегодовой температуры для всего Сибирского региона (см. табл. 1).

Анализ табл. 2 показывает, что в 2011–2020 гг. положительные тренды среднегодовой температуры воздуха наблюдаются почти на всей территории Сибирского региона, за исключением ст. Омск, где имеют место отрицательные тренды среднегодовой

Коэффициенты линейных трендов среднегодовой температуры (°С/10 лет) ПСА для типичных станций Сибирского региона за периоды 1981–2010/2011–2020 гг.

| Станция | Высота, м | | | | Станция | Высота, м | | | |
|---|------------|------------|------------|-------------|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 400 | 800 | 1600 | | 0 | 400 | 800 | 1600 |
| Западная Сибирь | | | | | Восточная Сибирь | | | | |
| <i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Диксон | 0,53/0,51 | 0,39/0,87 | 0,29/0,38 | 0,12/0,15 | Тикси | 0,39/2,06 | 0,49/1,48 | 0,48/0,99 | 0,40/0,97 |
| <i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Салехард | -0,08/1,53 | -0,06/1,02 | -0,08/0,97 | -0,08/-0,03 | Тура | -0,07/2,49 | -0,09/2,42 | -0,04/1,77 | -0,09/0,49 |
| Туруханск | -0,07/1,39 | -0,09/0,67 | -0,04/0,52 | -0,12/0,27 | Оленек | 0,48/0,56 | 0,25/0,35 | 0,31/0,32 | 0,24/0,00 |
| Александровское | -0,19/1,84 | -0,16/1,22 | -0,01/0,90 | 0,00/0,71 | Верхоянск | 0,22/1,00 | 0,16/1,25 | 0,28/1,01 | 0,18/0,64 |
| Бор | -0,26/1,45 | -0,10/0,93 | -0,08/0,77 | -0,20/0,44 | Якутск | 0,73/1,59 | 0,41/1,72 | 0,43/1,06 | 0,43/0,31 |
| <i>Умеренные широты (50–60° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Тобольск | 0,07/1,65 | 0,11/1,16 | 0,08/0,76 | 0,07/1,65 | Нижнеудинск | 0,07/1,20 | 0,03/0,96 | 0,05/0,90 | 0,07/1,20 |
| Омск | 0,17/-1,02 | 0,09/-0,58 | 0,03/-0,55 | 0,17/-1,02 | Киренск | 0,26/2,90 | 0,29/2,43 | 0,23/1,58 | 0,26/2,90 |
| Новосибирск | 0,15/1,24 | 0,16/0,77 | 0,05/0,52 | 0,15/1,24 | Чита | 0,35/1,59 | 0,25/1,42 | 0,17/1,22 | 0,35/1,59 |

температуры ПСА (от -0,55 до -1,02 °С/10 лет). Следовательно, последнее десятилетие внесло настолько заметный вклад в потепление ПСА Сибирского региона, что наблюдавшаяся в 1981–2010 гг. в субполярных широтах Западной и частично Восточной Сибири отрицательная тенденция изменения среднегодовой температуры [27, 29] сменилась на положительную. Кроме того, сравнение данных табл. 1 и 2 показало, что величины положительных линейных трендов, полученные для периода 1981–2020 гг., существенно превышают аналогичные значения для 1981–2010 гг. Исключение составляет только ст. Омск, где наблюдается обратная картина: слабая положительная тенденция изменения температуры ПСА за 30-летний период сменилась на почти нулевую за 1981–2020 гг.

Таким образом, за последние 40 лет рост температуры наблюдается во всем ПСА Сибирского региона, причем потепление усилилось по сравнению с 1981–2010 гг., за исключением крайней юго-западной части Сибири. Если в предыдущих исследованиях [27, 28] говорилось о замедлении потепления и выходе на «плато» на исследуемой территории, то аномально теплые 2015, 2016 и 2020 гг. [21] привели к почти повсеместному росту положительного тренда на интервале с 2011 по 2020 г. и, следовательно, с 1981 по 2020 г.

4. Изменения среднесезонной температуры

Рассмотрим особенности трендов среднесезонной температуры и их коэффициентов, оцененных по данным последнего 40-летнего периода, для каждого сезона. На рис. 2 представлены карты пространственного распределения коэффициентов линейных трендов изменения среднесезонной температуры воздуха на четырех уровнях ПСА Сибирского региона. Кроме того, в качестве примера в табл. 3 даны коэффициенты линейного тренда среднесезонной температуры ПСА для типичных станций Сибири за период 1981–2020 гг.

Анализ рис. 2 и табл. 3, а также всего имеющегося статистического материала показал, что зимой на большей территории Сибирского региона и во всем ПСА преобладают слабые отрицательные тренды. При этом максимальные по модулю значения коэффициентов ($|0,63-0,76|$ °С/10 лет) отмечаются в слое от 0 до 400 м. Положительные тренды долговременного изменения температуры воздуха наблюдаются зимой на всех высотах ПСА в полярных и субполярных широтах Западной Сибири, за исключением ст. Туруханск и Александровское, где у земной поверхности тренд отрицательный. Слабые положительные тренды температуры воздуха зимой отмечаются также только на уровне земной поверхности в субполярных широтах Восточной Сибири. Подчеркнем, что максимальные положительные тренды температуры наблюдаются в полярных районах Западной Сибири: от 1,06 °С/10 лет на уровне земной поверхности до 0,54 °С/10 лет на уровне 1600 м.

Весной во всем ПСА Сибирского региона преобладают статистически значимые положительные тренды температуры, которые колеблются от 0,51–1,16 °С/10 лет у земной поверхности до 0,11–0,81 °С/10 лет на уровне 1600 м. При этом наиболее высоких значений положительные тренды достигают в полярных широтах региона (0,73–1,16 °С/10 лет) (табл. 3). Весной величина трендов на всех станциях и во всем ПСА выше, чем летом и осенью.

Летом положительные статистически значимые тренды температуры отмечаются в полярных широтах всего Сибирского региона, в приполярных районах Западной Сибири (ст. Салехард и Туруханск), а также на всей территории Восточной Сибири.

Осенью статистически значимые положительные тренды температуры воздуха наблюдаются в полярных широтах всего региона и на отдельных станциях субполярной зоны Восточной Сибири. В субполярных широтах Западной Сибири и в умеренных широтах Сибирского региона тренды температуры ПСА хотя и положительные, но статистически

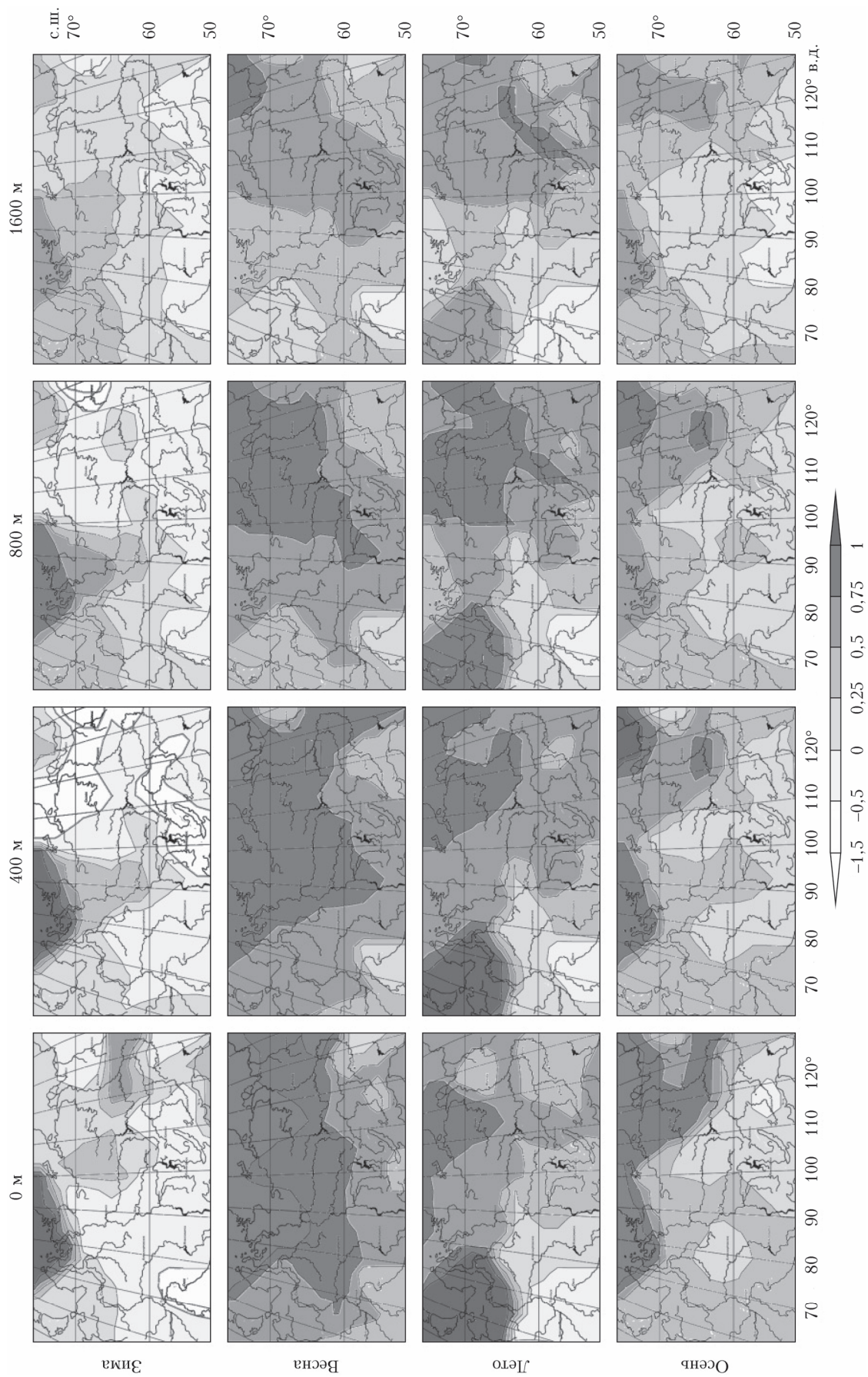


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов среднесезонной температуры ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) ПСА Сибирского региона

Таблица 3

Коэффициенты линейных трендов среднесезонной температуры (°С/10 лет) ПСА для типичных станций Сибири с 1981 по 2020 г. (подчеркнуты статистически значимые коэффициенты по критерию t-Стьюдента, $\alpha = 0,1$)

| Станция | Высота, м | | | | Станция | Высота, м | | | |
|---|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| | 0 | 400 | 800 | 1600 | | 0 | 400 | 800 | 1600 |
| Западная Сибирь | | | | | Восточная Сибирь | | | | |
| Зима | | | | | | | | | |
| <i>Полярные широты (70–75° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Диксон | <u>1,06</u> | <u>1,06</u> | <u>0,87</u> | <u>0,54</u> | Тикси | -0,02 | 0,32 | <u>0,42</u> | 0,27 |
| <i>Субполярные широты (60–70° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Салехард | 0,15 | 0,10 | 0,31 | 0,33 | Тура | 0,30 | -0,29 | -0,08 | 0,25 |
| Туруханск | -0,13 | 0,35 | 0,45 | 0,26 | Оленек | 0,17 | -0,70 | -0,22 | 0,06 |
| Александровское | -0,38 | -0,33 | 0,01 | 0,14 | Верхоянск | -0,53 | <u>-2,17</u> | <u>-1,70</u> | -0,16 |
| Бор | -0,03 | 0,43 | 0,43 | 0,22 | Якутск | <u>0,68</u> | <u>-0,55</u> | -0,40 | 0,02 |
| <i>Умеренные широты (50–60° с.ш.)</i> | | | | | | | | | |
| Тобольск | -0,41 | -0,23 | -0,04 | 0,07 | Нижнеудинск | -0,11 | -0,60 | -0,22 | 0,13 |
| Омск | <u>-0,63</u> | -0,21 | -0,14 | -0,13 | Киренск | -0,26 | <u>-0,76</u> | -0,33 | -0,09 |
| Новосибирск | -0,17 | -0,23 | -0,05 | -0,07 | Чита | 0,43 | -0,14 | -0,15 | -0,11 |
| Весна | | | | | | | | | |
| Диксон | <u>1,16</u> | <u>0,94</u> | <u>0,73</u> | <u>0,38</u> | Тикси | <u>1,03</u> | <u>1,08</u> | <u>0,96</u> | <u>0,81</u> |
| Салехард | <u>0,72</u> | <u>0,57</u> | <u>0,43</u> | 0,18 | Тура | <u>0,78</u> | <u>0,79</u> | <u>0,86</u> | <u>0,61</u> |
| Туруханск | <u>1,04</u> | <u>0,86</u> | <u>0,69</u> | 0,44 | Оленек | <u>1,09</u> | <u>0,96</u> | <u>0,82</u> | <u>0,61</u> |
| Александровское | <u>0,85</u> | <u>0,69</u> | <u>0,64</u> | 0,37 | Верхоянск | <u>0,74</u> | <u>0,31</u> | 0,48 | 0,42 |
| Бор | <u>0,86</u> | <u>0,83</u> | <u>0,69</u> | 0,45 | Якутск | <u>1,11</u> | <u>0,74</u> | <u>0,70</u> | <u>0,49</u> |
| Тобольск | <u>0,76</u> | <u>0,64</u> | <u>0,55</u> | 0,31 | Нижнеудинск | <u>0,68</u> | <u>0,54</u> | <u>0,65</u> | <u>0,65</u> |
| Омск | 0,32 | 0,14 | 0,08 | -0,08 | Киренск | <u>0,51</u> | <u>0,56</u> | <u>0,61</u> | <u>0,54</u> |
| Новосибирск | <u>0,72</u> | <u>0,74</u> | <u>0,63</u> | <u>0,44</u> | Чита | <u>0,60</u> | <u>0,49</u> | <u>0,45</u> | <u>0,11</u> |
| Лето | | | | | | | | | |
| Диксон | <u>0,73</u> | <u>0,65</u> | <u>0,45</u> | 0,17 | Тикси | <u>0,71</u> | <u>0,71</u> | <u>0,68</u> | <u>0,54</u> |
| Салехард | <u>1,38</u> | <u>1,08</u> | <u>0,88</u> | <u>0,56</u> | Тура | <u>0,56</u> | <u>0,69</u> | <u>0,74</u> | <u>0,60</u> |
| Туруханск | <u>0,70</u> | <u>0,73</u> | <u>0,60</u> | <u>0,37</u> | Оленек | <u>0,88</u> | <u>0,88</u> | <u>0,81</u> | <u>0,61</u> |
| Александровское | 0,13 | 0,19 | 0,25 | 0,17 | Верхоянск | <u>0,51</u> | <u>0,74</u> | <u>0,80</u> | <u>0,70</u> |
| Бор | 0,24 | 0,24 | 0,17 | 0,05 | Якутск | <u>0,49</u> | <u>0,60</u> | <u>0,60</u> | <u>0,46</u> |
| Тобольск | -0,07 | 0,10 | 0,10 | -0,06 | Нижнеудинск | <u>0,38</u> | <u>0,50</u> | <u>0,49</u> | <u>0,47</u> |
| Омск | -0,10 | -0,19 | -0,20 | -0,25 | Киренск | <u>0,59</u> | <u>0,67</u> | <u>0,73</u> | <u>0,73</u> |
| Новосибирск | <u>0,23</u> | <u>0,35</u> | <u>0,32</u> | 0,20 | Чита | <u>0,70</u> | <u>0,69</u> | <u>0,64</u> | <u>0,58</u> |
| Осень | | | | | | | | | |
| Диксон | <u>1,10</u> | <u>0,93</u> | <u>0,73</u> | <u>0,56</u> | Тикси | <u>1,03</u> | <u>1,04</u> | <u>0,88</u> | <u>0,63</u> |
| Салехард | 0,45 | 0,40 | 0,37 | 0,30 | Тура | 0,25 | 0,19 | 0,23 | 0,17 |
| Туруханск | 0,41 | 0,40 | 0,32 | 0,17 | Оленек | <u>0,97</u> | <u>0,61</u> | <u>0,62</u> | <u>0,44</u> |
| Александровское | 0,23 | 0,19 | 0,17 | 0,11 | Верхоянск | 0,42 | 0,10 | <u>0,41</u> | 0,39 |
| Бор | 0,28 | 0,32 | 0,25 | 0,11 | Якутск | <u>0,84</u> | <u>0,50</u> | <u>0,47</u> | <u>0,36</u> |
| Тобольск | 0,35 | 0,32 | 0,29 | 0,20 | Нижнеудинск | 0,01 | 0,04 | 0,00 | -0,10 |
| Омск | <u>0,49</u> | 0,29 | 0,23 | 0,12 | Киренск | 0,26 | 0,27 | 0,36 | 0,34 |
| Новосибирск | 0,30 | 0,20 | 0,48 | -0,05 | Чита | 0,35 | 0,28 | 0,19 | 0,11 |

незначимы. Статистическая значимость оценок коэффициентов тренда уменьшается с высотой в ПСА. Особенно это заметно для весны.

Полученные результаты (у земной поверхности) хорошо согласуются с [21], где приводятся региональные оценки трендов, полученные по временным рядам пространственно осредненных аномалий приземной температуры воздуха за 1976–2020 гг.

На рис. 3 в качестве примера даны тренды аномалий среднегодовой и среднесезонной температур воздуха на ст. Диксон на различных высотах ПСА с 1981 по 2020 г. с 90% доверительным интервалом

(серая область). Кроме того, приведены сглаживающие кривые для исходных среднесезонных и среднегодовых значений после фильтра низких частот с частотой отсечки $f = 0,056$. Также на рис. 3 наряду с трендами за 1981–2020 гг. представлены тренды за ранее исследуемый период (1981–2010 гг.) [27–29] и за последнее десятилетие. Показано, что в полярных районах Западной Сибири (ст. Диксон) величины положительных трендов температуры за последние 40 лет превышают значения трендов за период 1981–2010 гг. во все сезоны. Наибольшая разница в коэффициентах тренда за указанные

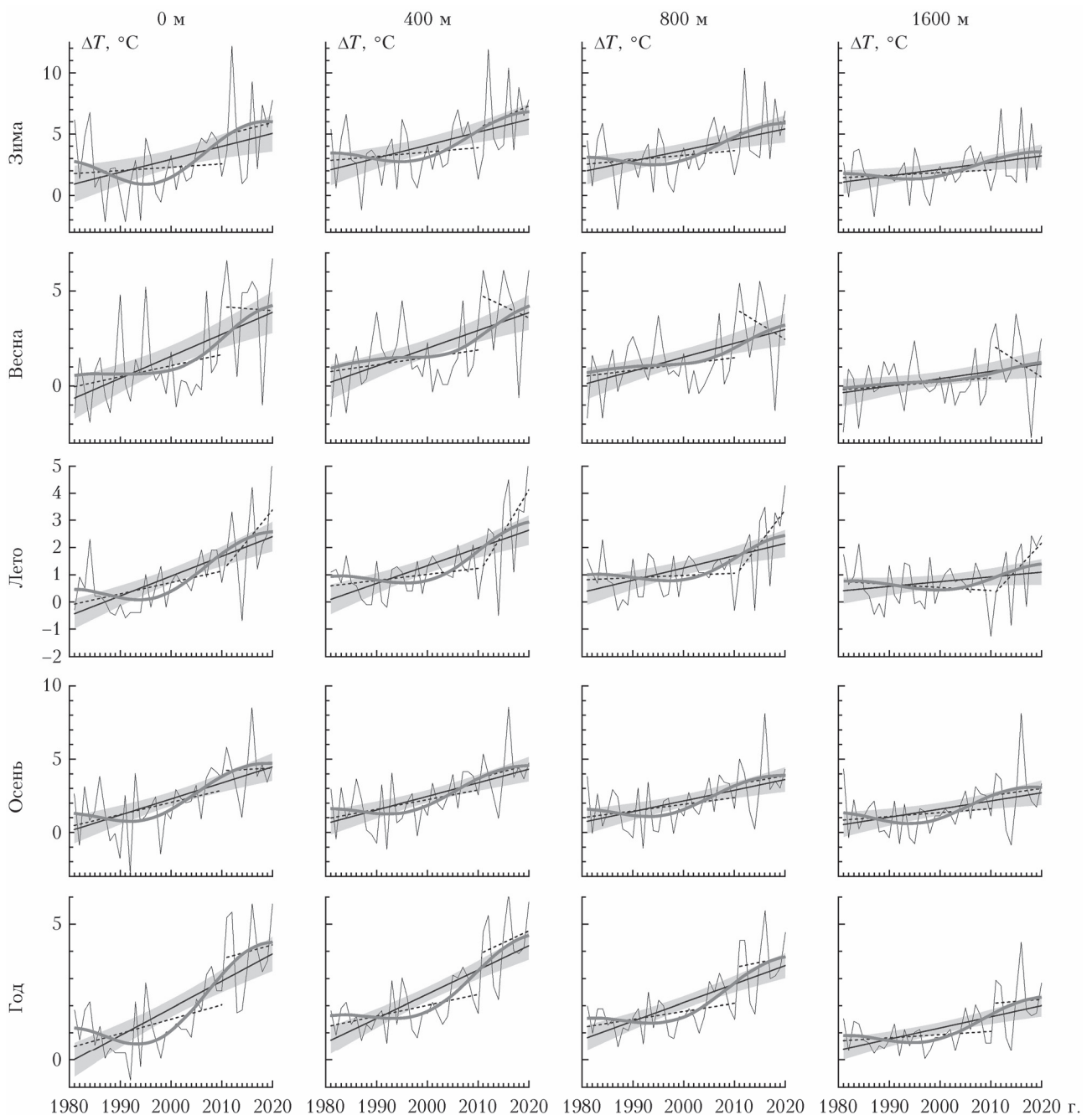


Рис. 3. Межгодовые изменения среднесезонных и среднегодовых температур воздуха для ст. Диксон (тонкая черная кривая): линейные тренды в ПСА за 1981–2020 гг. (полужирная черная прямая) с 90% доверительным интервалом (серая область); за 1981–2010 гг. и 2011–2020 гг. (штриховые прямые), а также сглаженная фильтром низких частот исходная последовательность (серая кривая)

периоды выражена зимой, весной и в целом за год, что говорит об усилении здесь потепления ПСА.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ особенностей долговременных изменений среднегодовой и среднесезонной температуры в ПСА Сибирского региона за период с 1981 по 2020 г. позволяет сделать следующие выводы.

Положительные тренды среднегодовой температуры воздуха наблюдаются во всем ПСА Сибири, тренды убывают с высотой. Максимальные значения коэффициентов тренда отмечаются в арктических регионах и уменьшаются по направлению к умеренным широтам. На территории Западной Сибири тренды среднегодовой температуры небольшие и статистически незначимые.

Зимой на всех высотах ПСА в умеренных широтах Сибирского региона отмечается похолодание.

В то же время в субполярных широтах Западной Сибири похолодание наблюдается у земной поверхности, а в Восточной Сибири — в более высоких слоях ПСА. При этом зимой в полярных районах всей, особенно Западной Сибири, а также в субполярной зоне Западной (на высотах ПСА) и Восточной (у земной поверхности) Сибири отмечено потепление ПСА. Потепление также преобладает во всем ПСА Сибири весной, летом и осенью. Максимальные значения положительных коэффициентов трендов температуры воздуха наблюдаются весной.

Потепление ПСА Сибири усилилось по сравнению с периодом 1981–2010 гг. При этом в полярных широтах региона главный вклад в повышение среднегодовой температуры вносят изменения среднесезонной температуры весной, осенью, зимой и в меньшей степени летом. В субполярных и умеренных широтах Западной Сибири среднегодовая температура возросла в основном за счет ее повышения весной, а в тех же широтах Восточной Сибири — благодаря весеннему и летнему росту среднесезонной температуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Шерстюков Б.Г.* Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2008. 247 с.
2. *Шерстюков Б.Г.* Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 293 с.
3. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Колебания и изменения климата на территории России // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39, № 2. С. 166–187.
4. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
5. *Переведенцев Ю.П.* Теория климата. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2009, 504 с.
6. *Ипполитов 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.
7. *Шевырнов А.П., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С.* Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 6. С. 77–87.
8. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Поднебесных Н.В., Харюткина Е.В.* Изменчивость температурного режима на азиатской территории России в период глобального потепления // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 122–131.
9. *Носкова Е.В., Обязов В.А., Вахнина И.Л.* Изменения приземной температуры воздуха на юге Сибири и их взаимосвязь с крупномасштабными циркуляционными процессами в атмосфере // Географ. вестн. Метеорол. 2021. Т. 57, № 2. С. 75–84.
10. *Жеребцов Г.А., Васильева Л.А., Коваленко В.А., Молодых С.И.* Долговременные изменения температуры и теплоемкости тропосферы в XX в. // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 473–478.
11. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
12. *Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / под ред.*

А.О. Кокорина. М.: Всемирный фонд дикой природы России, 2011. 168 с.

13. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* М.: Росгидромет, 2014. Т. 1. 59 с.
14. *Кабанов М.В.* Сезонные закономерности наблюдаемого потепления в Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 7–10.
15. *Харламова Н.Ф.* Долговременные климатические изменения на внутриконтинентальной территории России (Алтайский регион) // Изв. Алт. гос. ун-та. 2010. Т. 3, № 1. С. 133–140.
16. *Обязов В.А.* Региональный отклик приземной температуры воздуха на глобальные изменения (на примере Забайкалья) // Докл. АН. География. 2015. Т. 461, № 4. С. 459–462.
17. *Черенкова Е.А.* Региональные особенности изменения летней температуры в Западной Сибири во второй половине XX — начале XXI века // Изв. РАН. Сер. географ. 2016. № 4. С. 52–61.
18. *Усова Е.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В.* Влияние изменчивости потоков тепла в районе Баренцева моря на температурный режим Западной Сибири в зимний период // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 652–659. DOI: 10.15372/AOO20180809.
19. *Харюткина Е.В., Логинов С.В., Ипполитов И.И.* Роль радиационных и циркуляционных факторов в изменении климата Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52, № 6. С. 651–659.
20. *Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В., Пустовалов К.Н.* Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX — начале XXI веков // Фундам. и прикл. климатол. 2019. № 2. С. 45–65.
21. *Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год.* М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
22. *Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В.* Связь климатических характеристик с циклонической активностью в зимний период над Сибирью в 1976–2011 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 617–624; *Podnebesnykh N.V., Ippolitov I.I., Kabanov M.V.* Connections between climatic characteristics and cyclonic activity in winter over Siberia in 1976–2011 // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 1. P. 55–62.
23. *Скляднева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю.* Изменение радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 288–293. DOI: 10.15372/AOO20180407.
24. *Матвиенко Г.Г., Бабушкин П.А., Бобровников С.М., Боровой А.Г., Бочковский Д.А., Галилейский В.П., Гришин А.И., Долгий С.И., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Коношонкин А.В., Крючков А.В., Кустова Н.В., Невзоров А.В., Маричев В.Н., Морозов А.М., Ошлаков В.К., Романовский О.А., Суханов А.Я., Трифонов Д.А., Яковлев С.В., Садовников С.А., Невзоров А.А., Харченко О.В.* Лазерное и оптическое зондирование атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 726–740.; *Matvienko G.G., Babushkin P.A., Bobrovnikov S.M., Borovoi A.G., Bockovskii D.A., Galileiskii V.P., Grishin A.I., Dolgii S.I., Elizarov A.I., Kokarev D.V., Konoshonkin A.V., Kryuchkov A.V., Kustova N.V., Nevzorov A.V., Marichev V.N., Morozov A.M., Oshlakov V.K., Romanovskii O.A., Sukhanov A.Ya., Trifonov D.A., Yakovlev S.V., Sadovnikov S.A., Nevzorov A.A., Kharchenko O.V.* Laser

- and optical sounding of the atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 51–68.
25. Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839; Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtdinov I.M., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Chernov D.G. Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 24–30
 26. 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. 942–950.
 27. 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.
 28. Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я., Горев Е.В. Долговременные изменения температуры в пограничном слое атмосферы Сибирского региона. Часть 2. Изменение среднесезонной температуры // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 790–798.
 29. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В. Современные изменения климата пограничного слоя атмосферы над территорией Сибирского региона / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 212 с.
 30. Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В. Оценка современных тенденций изменения среднемесячной температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 9. С. 705–710. DOI: 10.15372/АОО20210906.

N.Ya. Lomakina, A.V. Lavrinenko. Modern trends in the temperature of the atmospheric boundary layer over Siberia.

Trends in long-term changes in the annual average and seasonal average temperatures within the atmospheric boundary layer in Siberia over 1981–2020, estimated based on observations at 24 aerological stations in winter, spring, summer, autumn, and for the year as a whole, are analyzed. It has been established that during the 40-year period under study, statistically significant positive trends in the annual average air temperature are observed throughout the atmospheric boundary layer over the Siberian territory; the trend value decreases from north to south and with altitude. The main contribution to the regional warming of the atmospheric boundary layer climate over Siberia is made by the spring, summer, and autumn periods. The warming of the boundary layer has intensified in the past decade, from 2011 to 2020.