

СРАВНЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ХИБИНАХ И НА ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРЕДГОРНОЙ РАВНИНЕ

В.И. Демин^{1)*}, *А.В. Волков*^{2)*}

¹⁾ ФГБНУ Полярный геофизический институт,
Россия, 184209, г. Апатиты, Академгородок, 26а; **demin@pgia.ru*

²⁾ Управление по ПБ и ОТ АО «Апатит»
Россия, 184250, г. Кировск, ул. Ленинградская, д. 1; **airep@mail.ru*

Резюме. Рассмотрены изменения температуры на горе Ловчорр в Хибинском горном массиве (1091 м н.у.м.) в 1965 - 2015 гг. Температура воздуха повышается во все сезоны со скоростью от 0.22 до 0.54°C/10 лет. В наибольшей степени это потепление проявляется весной, осенью и в первой половине зимы. Рост минимальных температур происходит быстрее, чем максимальных. При сравнении значений коэффициентов регрессии, отражающих тренд средних сезонных температур, статистически значимых различий в оценках для горы Ловчорр и для ближайших равнинных станций не обнаружено ни в каком из сезонов. Это позволяет говорить о примерно одинаковой скорости современного потепления.

Ключевые слова. Горная метеорология, горный климат, изменение климата, Хибины.

A COMPARISON OF AIR TEMPERATURE TRENDS IN THE Khibiny MOUNTAINS AND OVER SURROUNDING PLAINS

V. I. Demin^{1)*}, *A. V. Volkov*^{2)*}

¹⁾ Polar Geophysical Institute,
26a, Academgorodok, 184209, Apatity, Russia; **demin@pgia.ru*

²⁾ Industrial and Occupational Safety Department of JSC Apatit,
1, Leningradskaya, 184250, Kirovsk, Russia; **airep@mail.ru*

Summary. Temperature variations on the top of the Lovchorr mountain (Khibiny, 1091 m a.s.l.) in 1965–2015 were studied. Air temperature increases in all the seasons by 0.22 - 0.54°C per decade. The warming rate is the most pronounced in spring, autumn and in the first half of winter. The growth rate of minimal temperatures is higher than of maximal temperatures. No statistically significant differences in slope of linear regression, i.e., in trends of seasonal temperature means, were found for series of the Lovchorr mountain and those over surrounding plain stations. This indicates the similar rate of modern warming.

Keywords. Mountain meteorology, mountain climate, climate changes, Khibiny.

Введение

Согласно существующим оценкам, горные территории в целом более чувствительны к изменениям глобального климата, чем равнинные территории. Однако из-за небольшого числа горных метеорологических станций с длинными рядами наблюдений многие эффекты таких изменений остаются незамеченными. Кроме того, значительная их часть, несмотря на высотное положение, в действительности оказываются расположенными на приподнятых равнинах, в горных долинах и на склонах, где их показания подвержены влиянию микроклимата. Особый интерес представляют измерения на вершинах, метеорологический режим которых в значительной степени формируется под воздействием процессов в свободной атмосфере, информации об изменениях климата в которой недостаточно ввиду редкой сети аэрологических станций и их низкого временного разрешения.

Целью данной работы является анализ современных изменений температуры воздуха на г. Ловчорр в Хибинах и на окружающих предгорных равнинах. Хибины – крупнейший горный массив на Кольском полуострове с горизонтальными размерами примерно 40 на 50 км и абсолютными отметками 900-1200 м н.у.м. Метеорологическая площадка на г. Ловчорр расположена на высоте 1091 м н.у.м на открытой куполообразной вершине с наивысшей отметкой 1101.3 м и окружена с трех сторон цирками с отвесными стенами. Поверхность плато каменистая; растительность представлена лишь небольшими пятнами лишайников.

Использованные данные

В работе использованы данные отдела лавинной безопасности ОАО «Апатит», Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИ ГМИ), Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN-M).

Результаты и обсуждение

Метеорологические наблюдения на г. Ловчорр начались в 1962 г., однако из-за переноса метеорологической площадки климатически однородным можно считать ряд с осени 1964 г. Скорости изменения среднемесячных температур на г. Ловчорр в период 1964-2015 гг. показаны на рис.1. Скорости положительные и свидетельствуют о потеплении климата. Однако потепление неравномерное: оно наиболее выражено весной (апрель-май), осенью и в первой половине зимы (сентябрь-январь) и наименее заметно – летом и во второй половине зимы.

В 2015 г. 17-й Всемирный метеорологический конгресс принял резолюцию о ежедекадном обновлении норм большинства метеопараметров (WMO 2015). Согласно этому решению стандартные нормы рассчитываются за последова-

тельные 30-летние периоды с шагом 10 лет, т.е. текущие нормы за 1981-2010 гг., далее 1991-2020 г., и т.д. в то время как период «1961-1990 гг.» остается базовым для оценки долгопериодных климатических изменений. Для получения недостающих данных для расчета климатической нормы 1961-1990 гг. для г. Ловчорр, можно воспользоваться измерениями на располагавшейся в 7 км к северо-западу метеорологической станции на г. Юкспор (910 м н.у.м.). Между среднемесячными температурами на г. Ловчорр и г. Юкспор в период их совместной работы (1964-1980 гг.) наблюдается высокая корреляция (коэффициенты корреляции от 0.991 до 0.997). Восстановление ряда на г. Ловчорр в период 1961-1964 гг. проведено на основе методики, приведенной в (Лобанов и др., 2005).

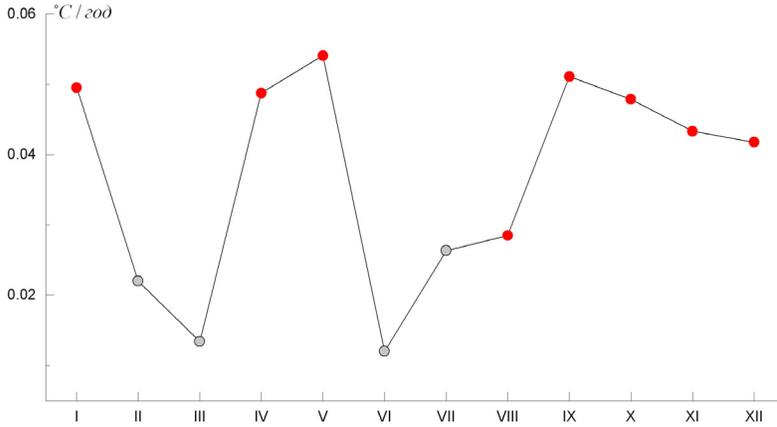


Рисунок 1. Скорости изменения среднемесячных температур на г. Ловчорр в период 1964-2015 гг. красным цветом отмечены значения в месяцы со статистически значимыми трендами

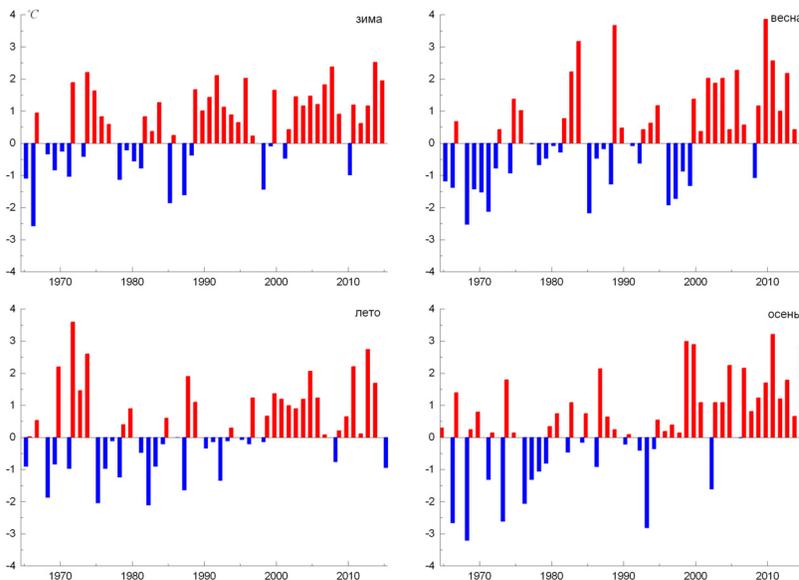


Рисунок 2. Аномалии сезонных температур на г. Ловчорр от климатической нормы, рассчитанной по периоду 1961-1990 гг.

Аномалии сезонных температур на г. Ловчорр относительно нормы «1961-1990 гг.» представлены на рис. 2. Выделение сезонов для Кольского п-ова: зима – ноябрь–март, весна – апрель и май, лето – июнь, июль, август, осень – сентябрь и октябрь (Яковлев, 1961). За прошедшие 25 лет (1991-2015 гг.) климатическая норма была превышена 21 раз зимой, 18 весной, 17 летом и 20 осенью. Это свидетельствует о том, что климатические нормы, рассчитанные по периоду 1961-1990 гг., в регионе можно считать устаревшими. Разность среднемесячных температур воздуха на г. Ловчорр, рассчитанных для периода 1981-2010 гг., и соответствующих значений для периода 1961-1990 гг. показана на рис. 3. Изменения средних максимальных и минимальных температур происходят с разной скоростью: рост минимальных температур происходит быстрее, чем максимальных (рис.3).

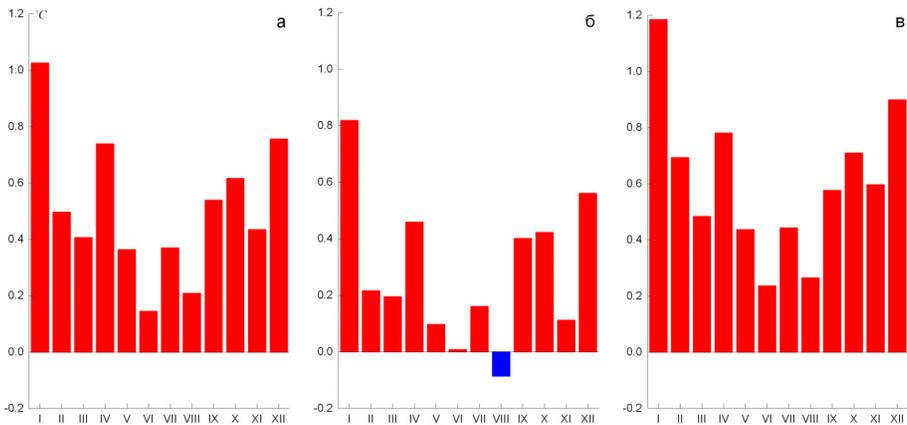


Рисунок 3. Разность среднемесячных (а), средних максимальных (б) и минимальных (в) температур на г. Ловчорр, рассчитанных для периодов 1981-2010 и 1961-1990 гг.

Согласно теоретическим оценкам и наблюдениям, скорость потепления с высотой не остается постоянной. Так, например, в работе (Ohmura, 2012) после обработки измерений на 56 горных станциях, объединенных в 18 региональных групп внутри основных горных массивов, было обнаружено, что в 65% групп рост температуры вблизи вершин и хребтов идет быстрее, чем у их подножий. В 25 % – наибольшее повышение наблюдается на средних уровнях и в 15 % – у подножия гор. За такую неоднозначность ответственны сразу несколько механизмов (Pepin et al., 2015; Rangwala, Miller, 2012):

1. Наличие снежного покрова в горах сильно ограничивает рост максимальных температур в теплое полугодие из-за значительных энергозатрат на таяние снега. Из-за разного альбеда снежных и бесснежных поверхностей перемещение снеговой линии приведет к новым условиям радиационного и теплового баланса на освободившихся от снега участках. Изменению альбеда способствует и продвижение верхней границы леса по склонам.
2. В атмосфере с высотой абсолютная влажность уменьшается. При низком влагосодержании воздуха (особенно ниже 2.5 г/м^3), характерных для вершин, не все уходящее длинноволновое излучение задерживается.

В таких условиях небольшое увеличение содержания водяного пара может оказать значительное влияние на потоки длинноволновой радиации (Naud et al., 2013). Из закона излучения Стефана-Больцмана следует, что верхние ярусы гор с меньшей температурой воздуха более чувствительны к изменению радиационных потоков, чем их подножия (Ohmura, 2012).

3. Облачность играет значительную роль в управлении радиационными потоками в атмосфере, а также и вносит свой вклад в тепловой баланс склонов через выделение скрытого тепла при конденсации. В зависимости от положения станции относительно облачного слоя изменение количества облаков на разных уровнях, их вертикальных границ и водности по-разному скажутся на изменении температуры (Duan, Wu, 2006).
4. Антропогенные загрязнения в виде аэрозолей и оптически активные газовые примеси, уменьшающие поток коротковолновой радиации к нижним частям гор и удерживающие уходящее длинноволновое, концентрируются, главным образом, в нижней атмосфере (как правило, до 3 км).

Суммарный эффект названных факторов носит сложный характер и зависит от региона и времени года. Например, роль изменения альбедо наибольшая в тех регионах, где происходят изменения положения снеговой линии. Вклад вариаций облачности увеличивается при высоких температурах и доминирует в тропиках. В противоположность этому, аэрозольная нагрузка концентрируется в средних широтах, где ведется активная хозяйственная деятельность. Фактор, вызванный дополнительным поглощением водяного пара, должен быть наиболее заметен зимой в высоких горах и в Арктике, где наблюдается низкое влагосодержание. Однако даже на региональном уровне картина может быть неоднородной. Например, на скорость изменения температуры может оказать влияние ориентация склонов к основным влагонесущим потокам, создающих различия в облачности на наветренных и подветренных склонах, неодинаковое по высоте положение снеговой линии и даже форма рельефа (Perin et al., 2011).

Представляет интерес сравнение современных изменений температуры воздуха на г. Ловчорр с ее изменениями на окружающей Хибинской равнине. Ближайшими равнинными станциями с длинными и климатически однородными рядами наблюдений являются расположенная в 54 км северо-западнее гидрометеорологическая станция (ГМС) «Мончегорск» (140 м н.у.м.) и в 67 км к северо-востоку ГМС «Ловозеро» (159 м н.у.м.). Коэффициенты корреляции между сезонными температурами на г. Ловчорр и на ГМС «Мончегорск» – 0,944, 0,958, 0,972, 0,974 для зимы, весны, лета и осени соответственно, а с температурами на ГМС «Ловозеро» – 0,934, 0,922, 0,927, 0,964. Чтобы геометрически охватить весь Хибинский массив, к сравнению были добавлены данные расположенной в 80 км к юго-западу от г. Ловчорр ГМС «Кандалакша» (26 м. н.у.м.) и ГМС «Умба» (39 м. н.у.м.), находящейся в 104 км к юго-юго-востоку. Коэффициенты корреляции сезонных температур на г. Ловчорр и на ГМС «Кандалакша» – 0,934, 0,923, 0,972 и 0,963, а на г. Ловчорр и на ГМС «Умба» – 0,941, 0,920, 0,939 и 0,975. Географическое положение всех

использованных в работе ГМС указано на рис. 4. Вариации сезонных температур на г. Ловчорр и на равнинных ГМС «Мончегорск» и «Ловозеро» в период 1965-2015 гг. и их линейные тренды, демонстрирующие потепление, показаны на рис. 5. Чтобы не перегружать рис. 5, значения на ГМС «Кандалакша» и «Умба» не добавлены.



Рисунок 4. Расположение горнолавиной станции на г. Ловчорр (1) и равнинных ГМС: 2 – Мончегорск, 3 – Ловозеро, 4 – Кандалакша, 5- Умба

За скорость климатических изменений принимают угловой коэффициент b в уравнении линейного тренда $Y=a+bX$, определенный по методу наименьших квадратов (Оценочный доклад, 2008). Однако коэффициенты в уравнениях регрессии определяются с некоторой погрешностью. В математической

статистике существует процедура сравнения углов наклона регрессий на предмет их статистически значимого различия (см, например, (Хальд, 1956; Zar, 2009)).

Процедура сравнения наклонов нескольких регрессий приведена в (Zar, 2009). По всем уравнениям регрессий вычисляется объединенная остаточная оценка дисперсии SS_p , а по уравнению регрессии, построенному по объединенной выборке, рассчитывается остаточная дисперсия SS_c . По полученным данным рассчитывается параметр:

$$F = \frac{\frac{SS_c - SS_p}{k - 1}}{\frac{SS_p}{DF_p}}$$

который сравнивается с критическим значением $F_{кр}$ при степенях свободы $k-1$ (k – число регрессий), и $DF_p = \sum_{i=1}^n (n_i - 2)$. Нулевая гипотеза (углы наклона равны $b_1=b_2=\dots=b_k$) отвергается, если $F > F_{кр}$.

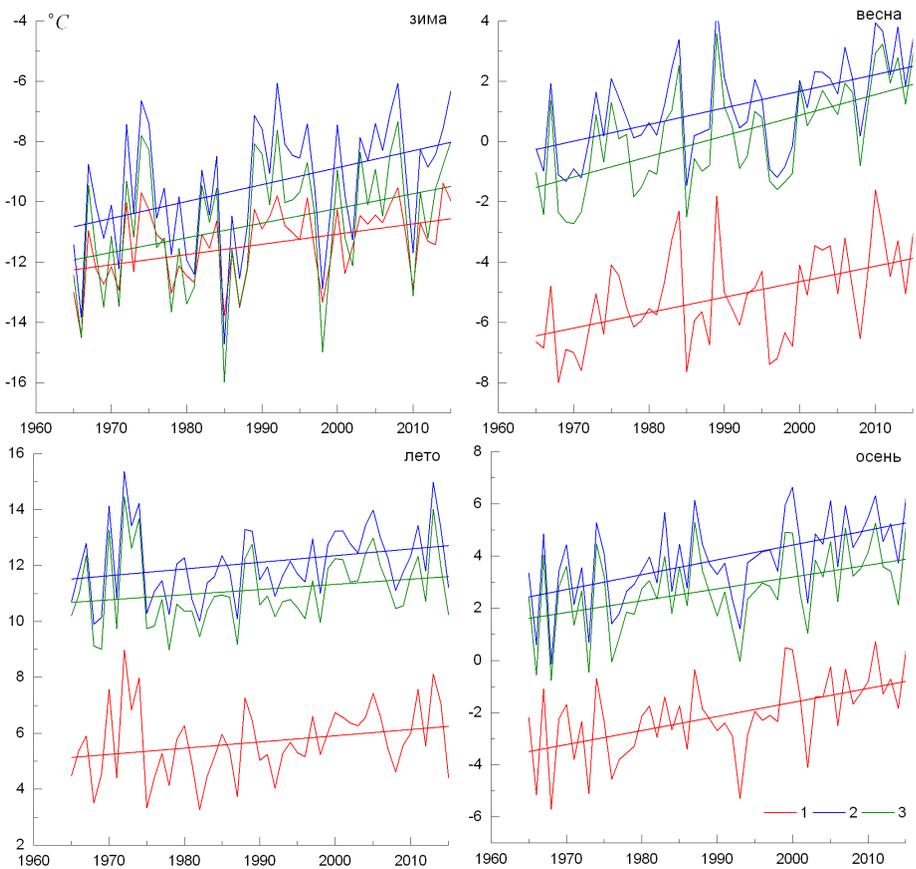


Рисунок 5. Динамика сезонных температур в период 1965-2015 гг. и их линейные тренды: 1 – г. Ловчорр, 2 – Мончегорск, 3 – Ловозеро

Скорости изменений сезонных температур на г. Ловчорр и на ближайших равнинных ГМС в период 1964–2015 гг., а также рассчитанные значения параметра F приведены в таблице 1. Скорости изменений численно отличаются. Однако во всех сезонах уровень значимости p принимает довольно большие значения, чтобы можно было отвергнуть гипотезу о совпадении углов наклона. Линейные тренды сезонных температур для выбранных ГМС параллельны, а скорости потепления в период 1966–2015 гг. следует считать одинаковыми. Это потепление можно выразить общей скоростью $0.52^\circ\text{C}/10$ лет для зимы, $0.57^\circ\text{C}/10$ для весны, $0.22^\circ\text{C}/10$ для лета, $0.50^\circ\text{C}/10$ лет для осени. Так как гипотеза об одинаковом наклоне не отклоняется, нет необходимости проводить процедуру множественного попарного сравнения, позволяющую обнаружить значимые отклонения индивидуальных регрессий.

Причины, по которым скорости потепления на вершине г. Ловчорр не отличаются от скорости потепления на равнинных станциях, по всей видимости, обусловлены небольшими горизонтальными и вертикальными размерами горного массива, из-за которых Хибины не создают непреодолимого барьера для воздушных масс. Здесь нет орографического анти- и циклогенеза, массив не является разделом климатических зон, как это часто имеет место в крупных горных системах. Потому все изменения в горах и на ближайших равнинах, вызванные макромасштабными процессами в тропосфере, оказываются в сильной корреляции. В период с 1965 г. нет признаков того, что разность температуры между вершинами в Хибинах и прилегающей равниной заметно изменилась (рис. 5).

Таблица 1. Угловые коэффициенты (b) в уравнениях линейного тренда сезонных температур на г. Ловчорр и на ближайших равнинных ГМС, остаточные дисперсии (ss), объединенная остаточная оценка дисперсии SS_p , остаточная дисперсия объединенной выборки (SS_c), параметр F и p

ГМС	зима		весна		лето		осень	
	b	ss	b	ss	b	ss	b	ss
г. Ловчорр	0.0339	60.82	0.0514	93.17	0.0223	76.95	0.0539	80.63
Мончегорск	0.0557	176.66	0.0551	83.77	0.0240	77.70	0.0566	87.04
Ловозеро	0.0487	188.94	0.0685	92.76	0.0185	80.35	0.0454	92.62
Кандалакша	0.0571	185.734	0.0523	67.072	0.0185	55.59	0.0454	88.40
Умба	0.0645	177.84	0.0567	71.58	0.0245	60.53	0.0486	80.42
SS_p	****	789.98	****	408.35	****	351.13	****	429.11
SS_c	0.0520	795.86	0.0568	410.44	0.0216	351.51	0.0500	430.23
	$F(4,245)=0.46$		$F(4,245)=0.313$		$F(4,245)=0.065$		$F(4,245)=0.161$	
	$p=0.77$		$p=0.87$		$p=0.99$		$p=0.96$	

Однако утверждение об одинаковой скорости современного потепления не означает, что разность температур между вершинами и равнинами остается постоянной на относительно коротких временных интервалах. На рис. 7 показана сглаженная по десятилетиям разность среднемесячных температур на г. Юкспор и г. Ловчорр и на ГМС «Ловозеро» в виде аномалий от их

средних разностей за период параллельных измерений (1936-1980 гг. для г. Юкспор и 1965-2015 гг. для г. Ловчорр). Как видим, в зависимости от макроциркуляционных особенностей текущего года и группы лет разность температур может заметно отклоняться от своего среднего значения, причем формируются периоды с аномалиями одного знака. Это означает, что климатическое описание вертикального профиля температуры по коротким рядам наблюдений может оказаться ошибочным. Не вполне надежным оказывается и традиционно используемый в климатологии метод приведения коротких рядов.

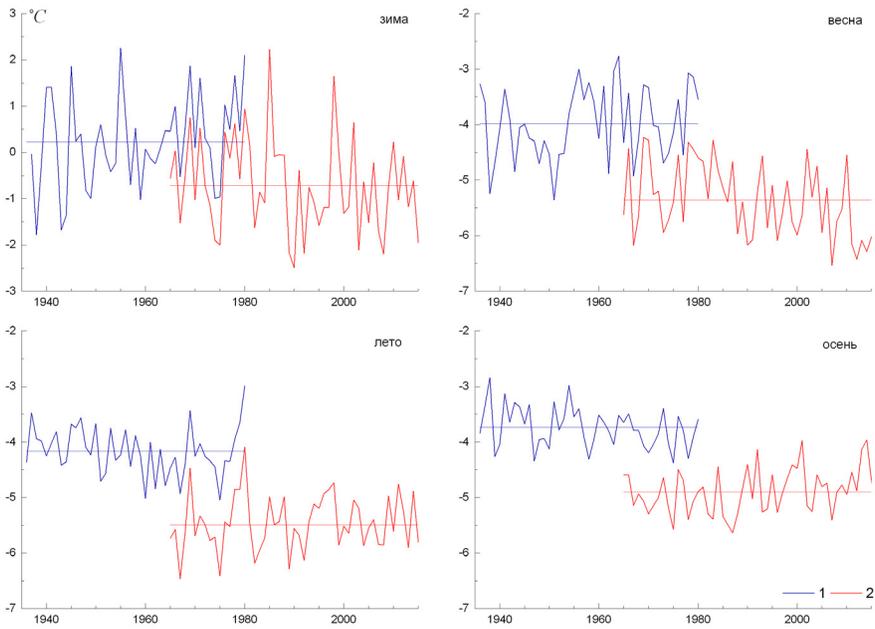


Рисунок 6. Разность средних сезонных температур между г. Юкспор и ГМС «Ловозеро» (1) и г. Ловчорр и ГМС «Ловозеро» (2)

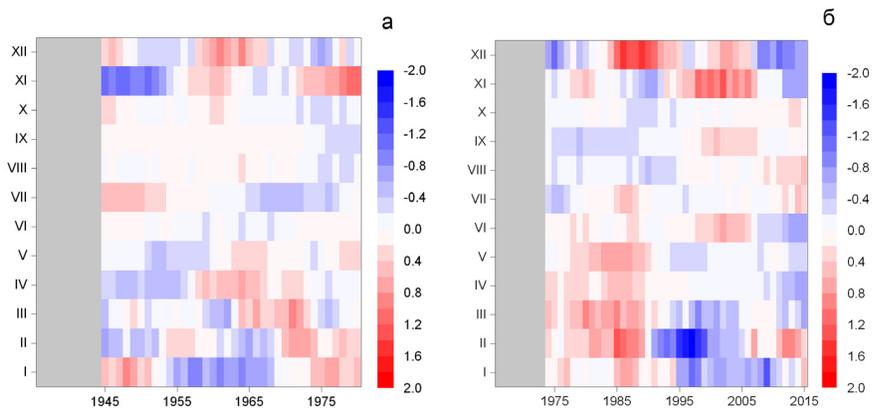


Рисунок 7. Аномалии разностей среднемесячных температур между г. Юкспор и ГМС «Ловозеро» (а) и г. Ловчорр и ГМС «Ловозеро» (б) от среднего значения за период параллельных наблюдений после десятилетнего сглаживания

В последние десятилетия в климатологии активно используются результаты реанализов. В работе (Хан и др., 2003) показано, что четырехмерная схема усвоения данных, использованная для реанализа NCAR/NCER, не вносит существенных искажений в значения трендов температуры свободной атмосферы, и данные реанализа можно вполне корректно использовать для анализа трендов в свободной атмосфере.

Воспользуемся данными NCER/NCAR с 1948 г. на уровнях 925 и 850 гПа и сопоставим их результаты с данными наблюдений на г. Ловчорр. Ценность такого сопоставления обусловлена тем, что из-за ведомственной принадлежности горно-лавинной станции на г. Ловчорр, на базе которой проводятся метеорологические измерения, ее данные не представлены в климатических архивах, а, значит, могут быть использованы для оценки качества существующих реанализов.

Коэффициенты корреляции среднемесячных температур на г. Ловчорр и в свободной атмосфере по данным реанализа NCER/NCAR очень высокие: от 0.95 до 0.98 с температурой на уровне 925 гПа и от 0.94 до 0.98 с температурой на уровне 850 гПа. Реанализ NCER/NCAR хорошо воспроизводит наблюдающиеся колебания сезонных температур на гг. Ловчорр и Юкспор и их долговременные изменения (рис. 8). Линейные тренды рядов температуры на г. Ловчорр и на уровнях 925 и 850 гПа по данным реанализа NCER/NCAR с 1965 г. имеют одинаковые углы наклона (проверено по методике, изложенной выше). Это позволяет предположить, что современное потепление в регионе имеет примерно одинаковую скорость во всем пограничном слое атмосферы и вызвано едиными механизмами.

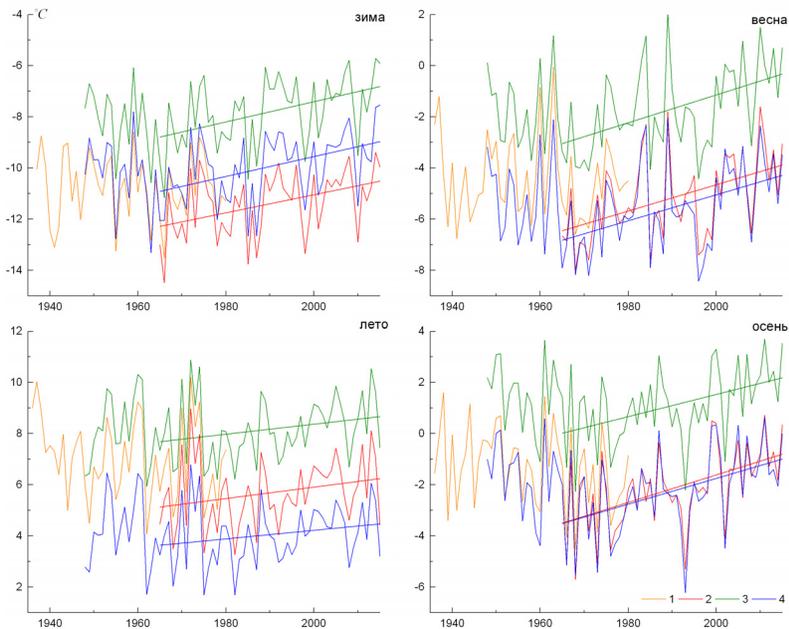


Рисунок 8. Динамика сезонных температур:

1 – г. Юкспор, 2 – г. Ловчорр, 3 – 925 гПа (реанализ NCER/NCAR), 4 – 850 гПа (реанализ NCER/NCAR); линейные тренды с 1965 г.

Предполагая, что температура воздуха в свободной атмосфере между уровнями 925 и 850 гПа меняется линейно, можно рассчитать температуру воздуха на высотах 910 и 1091 м:

$$t = t_{925} - \frac{(h - h_{925})}{(h_{850} - h_{925})} (t_{925} - t_{850})$$

где t – температура на высоте h , t_{925} , t_{850} – температуры на уровнях 925 и 850 гПа, h_{925} , h_{850} – высоты данных уровней. Оцененная таким способом температура воздуха на высоте 1091 м оказывается выше, чем на г. Ловчорр: на 2-2.4°C зимой и на 0.2-0.6°C летом. Для г. Юкспор, расположенной ниже (910 м), разница оказывается меньшей: на 1.0°C зимой и 0.3°C летом. Такое явление (более низкие температуры на вершинах по сравнению с температурой на соответствующем уровне в свободной атмосфере) действительно наблюдаются на горных вершинах и объясняется вынужденным подъемом и охлаждением воздуха при натекании на горный массив (Barry, 2008). В летнее время охлаждение компенсируется за счет продолжительной солнечной инсоляции в горах (с начала третьей декады мая и до середины июля в Хибинах наблюдается полярный день). Однако, из-за использования данных реанализа вместо данных о фактической температуре над Хибинами, заключение о реальной разности температур между горными вершинами и свободной атмосферой нуждается в дополнительной экспериментальной проверке.

Заключение

Рассмотрены изменения температуры воздуха в период с 1965 по 2015 гг. на вершине г. Ловчорр (1091 м н.у.м.) – одной из самых высоких в Хибинском горном массиве – и на ближайших равнинных ГМС. Потепление на г. Ловчорр наблюдается во все сезоны. В наибольшей степени оно проявляется весной, осенью и в первой половине зимы и в наименьшей – летом и во вторую половину зимы. Изменения минимальных температур более выражено, чем максимальных.

При сравнении линейных регрессий, отражающих тренд сезонных температур на г. Ловчорр и на ближайших равнинных станциях, статистически значимых различий в углах наклона нет ни в одном из сезонов. Это позволяет говорить о примерно одинаковой скорости современного потепления на вершинах Хибин и на окружающей равнине.

Список литературы

Лобанов В.А., Жильцова Е.Л., Лемешко Н.А., Горлова С.А., Ренева С.А. 2005. Восстановление многолетних рядов температуры на европейской территории России. – Метеорология и гидрология, № 2, с. 5-14.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменение климата. 2008. – М., Росгидромет, НИЦ «Планета», 230 с.

Яковлев Б.А. 1961. Климат Мурманской области. – Мурманск, Мурманское кн. изд-во, 180 с.

Хальд А. 1956. Математическая статистика с техническими приложениями. – М., Изд. иностранной литературы, 664 с.

Хан В.М., Стерин А.М., Рубинштейн К.Г. 2003. Оценки трендов температуры в свободной атмосфере по данным реанализа и радиозондовым наблюдениям. – Метеорология и гидрология, №12, с. 5-18.

Barry R.G 2008. Mountain weather and climate. – Cambridge University Press, Cambridge, 506 p.

Duan A., Wu G. 2006. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. – Geophys. Res. Lett, 33, L22704.

Naud C.M., Chen Y.-H., Rangwala I., Miller J.R. 2013. Sensitivity of downward longwave surface radiation to moisture and cloud changes in a high elevation region. – J. Geophys. Res. Atmos., vol. 118, No. 17, pp 10072-10081.

Ohmura A. 2012. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change. – Theoretical and Applied Climatology, vol. 110 (4), pp. 499-508.

Pepin N., Bradley R. S., Diaz H. F. et. al. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. – Nature Climate Change, vol. 5, No. 5, pp. 424-430.

Pepin N., C. Daly and J. D. Lundquist. 2011. The Influence of Surface/Free-Air Decoupling on Temperature Trend Patterns in the Western U.S. – J. of Geophys. Res., 116 (D10), D10109, doi:10.1029/2010JD014769.

Rangwala I., Miller J. R. 2012. Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. – Climatic Change, vol. 114, pp 527–547.

Zar H.J. 2009. Biostatistical Analysis. – New Jersey, Pearson, 946 p.

WMO 2015: Seventeenth World Meteorological Congress. Geneva, 25 May–12 June 2015. Abridged final report with resolutions. WMO-№1157, 708 p.

Статья поступила в редакцию: 07.04.2017

После переработки: 17.05.2017