

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПОТЕПЛЕНИЯ В ХИБИНАХ, НА ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРЕДГОРНОЙ РАВНИНЕ И В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

В.И. Демин¹, А.В. Волков²

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты

²Управление по ПБ и ОТ АО «Апатит», г. Кировск

Аннотация. Рассмотрены изменения температуры на г. Ловчорр (Хибины, 1091 м н.у.м.) в период 1965-2015 гг., на метеорологических станциях, расположенных на окружающих Хибинских равнинах, а также данные реанализа температуры воздуха NCEP/NCAR. Температура воздуха в Хибинах повышается во все сезоны. При сравнении линейных регрессий, отражающих тренд средних сезонных температур на г. Ловчорр и на ближайших равнинных станциях, статистически значимых различий в углах наклона нет ни в одном из сезонов. Показано, что данные реанализа температуры NCEP/NCAR на уровнях 925 и 850 гПа очень хорошо воспроизводят реально наблюдаемые вариации температуры в Хибинах.

Введение

Согласно большинству оценок, скорости климатических изменений в горах возрастают с высотой, а горы в целом более чувствительны к изменениям глобального климата. Однако из-за небольшого числа горных метеорологических станций с большими рядами наблюдений многие эффекты в изменениях климата горных территорий остаются незамеченными. Например, в России среди 135 станций, участвующих в глобальной системе наблюдений за климатом (GSN) только 1 расположена на высоте более 1000 м. В Европе отметки на высотах от 1000 до 2000 м имеют 5 станций, на высотах от 2000 до 3000 м – 6, более 3000 м – 2. Однако среди представленных в GSN горных станций значительная их часть расположена в горных долинах и на склонах, где их показания в значительной степени подвержены влиянию микроклимата. Главным же интересом представляют измерения на вершинах, так как их климат в значительной степени формируется под воздействием процессов в свободной атмосфере. Эксперименты показывают, что вершины гор вдали от урбанизированных районов могут обеспечить относительно объективную запись изменений климатических параметров тропосферы.

Целью данной работы является анализ современных климатических изменений на г. Ловчорр в Хибинах и на окружающих предгорных равнинах.

Использованные данные

В работе использованы данные отдела лавинной безопасности ОАО «Апатит», Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИ ГМИ) и European Climate Assessment & Dataset project.

Результаты и обсуждение

Метеорологические наблюдения на г. Ловчорр начались в 1962 г. С осени 1964 г. по конца 2015 г. положение метеорологической площадки остается неизменным: 67°36' с.ш., 33°51' в.д. высота 1091 м н.у.м. Расположена она на куполообразной вершине г. Ловчорр, окруженной с трех сторон цирками с отвесными стенами. Поверхность плато каменистая. Растительность на плато представлена лишь небольшими пятнами лишайников.

В период с 1936 г. по 1980 г. в 7 км к северо-западу от г. Ловчорр работала метеорологическая станция на г. Юкспор (910 м). Учитывая, что ряды климатически однородные и между среднемесячными и среднесезонными температурами на г. Ловчорр и г. Юкспор в период их совместной работы (1964-1980 гг.) имеется значительная корреляция (0.991-0.997), ряд по г. Ловчорр можно весьма надежно продлить к 1936 г. (пример методики восстановления приведен [Лобанов и др., 2005]). Ближайшими равнинными станциями с длинными и климатически однородными рядами наблюдений можно считать расположенную в 54 км северо-западнее гидрометеорологическую станцию (ГМС) «Мончегорск» (67°57', 32°55', 140 м) и в 67 км к северо-востоку ГМС «Ловозеро» (68°0', 35°02', 161 м). Несмотря на существенно разное положение, сезонные температуры на г. Ловчорр оказываются в очень хорошей корреляции с температурой на равнинных станциях. Коэффициенты корреляции с ГМС «Мончегорск» – 0.944, 0.958, 0.972, 0.974, а с «Ловозеро» – 0.934, 0.922, 0.927, 0.964 для зимы, весны, лета и осени соответственно. Вариации сезонных температур в период с 1965 г. и их линейные тренды, демонстрирующие потепление во все сезоны, на г. Ловчорр и на ГМС «Мончегорск» и «Ловозеро» показаны на рис. 1.

Существует также несколько факторов, способствующих неодинаковому характеру климатических изменений с высотой в горной местности:

1. Альbedo снежных и бесснежных поверхностей сильно отличается. Поэтому первоначальное изменение положения снеговой линии из-за повышения температуры или изменения количества осадков, в дальнейшем будет усилено из-за новых условий радиационного и теплового баланса.
2. При низком влагосодержании в воздухе (ниже 2.5 г/м^3) не все уходящее длинноволновое излучение задерживается. Небольшое увеличение содержания водяного пара может оказать значительное влияние на потоки длинноволновой радиации. Из формулы, описывающей излучение (Стефана-Больцмана), следует, что вклад этих изменений наиболее заметен при низких температурах, которые наблюдаются на вершинах гор.
3. Вариации облачности по-разному воздействуют на радиационные потоки и тепловой баланс территорий выше и ниже основных облачных слоев.
4. Антропогенные загрязнения концентрируются в нижней атмосфере (правило, до 3 км). Они уменьшают приток коротковолновой радиации к нижним частям гор и удерживают уходящую длинноволновое. Вместе с тем следы многих аэрозолей (например, черный углерод) и почвенная пыль, образующая вследствие нарушения травяного покрова в процессе землепользования, переносится высоко в атмосферу и в горы с ветрами при местных и глобальных циркуляциях, уменьшая альbedo выше границы снеговой линии и усиливая потепления наверху.

Суммарный эффект названных факторов носит сложный характер и зависит от региона и времени года. Например, роль изменения альbedo будет наибольшей в тех регионах, где происходит 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 низкое влагосодержание.

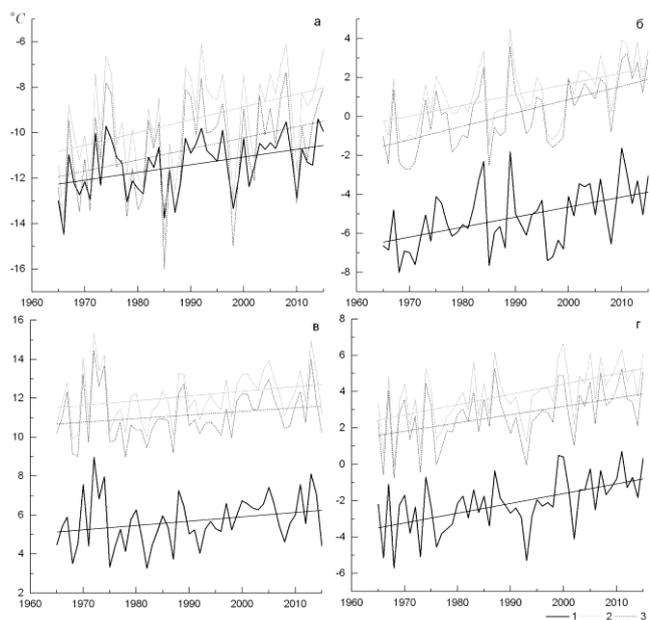


Рисунок 1. Динамика сезонных температур на г. Ловчорр (1), в Мончегорске (2) и в Ловозеро (3):

а – зима, **б** – весна, **в** – лето, **г** – осень

на выбранных ГМС несколько отличаются. Однако в МНК коэффициенты линейной регрессии находятся с ошибкой. Потому, чтобы ответить на вопрос, насколько значимы различия между скоростями потепления на разных ГМС, необходимо провести их парное сравнение. Воспользуемся для этого критерием Тьюки, который представляет собой модифицированный критерий Стьюдента:

$$q = \frac{|b_i - b_j|}{\sqrt{MSE/n}} = \frac{|b_i - b_j|}{SE}$$

где MSE - внутригрупповая дисперсия, SE – стандартная ошибка. Благодаря тому, что в приведенную выше формулу входит внутригрупповая дисперсия MSE , обеспечивается контроль над групповой вероятностью ошибки первого рода. Это делает критерий Тьюки подходящим критерием для выполнения множественных сравнений [Maxwell et al., 2004; Zar, 2009].

В соответствии с принятыми соглашениями за скорость климатических изменений принимают угловой коэффициент b в уравнении линейного тренда $Y=a+bX$, определенный по методу наименьших квадратов (МНК) [6].

Данные коэффициенты для г. Ловчорр и равнинных ГМС «Мончегорск» и «Ловозеро» приведены в табл. 1. Чтобы геометрически охватить весь Хибинский массив, к сравнению были добавлены данные расположенной в 80 км к юго-западу от г. Ловчорр ГМС «Кандалакша» (коэффициенты корреляция сезонных температур на г. Ловчорр и на ГМС «Кандалакша» - 0.934, 0.923, 0.972 и 0.963) и в 104 км к юго-юго-востоку ГМС «Умба» (корреляции 0.941, 0.920, 0.939 и 0.975). Хибины и г. Ловчорр в этом случае оказываются внутри фигуры, образованной ГМС «Мончегорск», «Ловозеро», «Умба», «Кандалакша». Чтобы не загромождать данные ГМС «Кандалакша» и «Умба» на рис. 1 не добавлены.

Как видно из таб. 1, скорости потепления

ГМС	зима	весна	лето	осень
Ловчорр	0.0339	0.0514	0.0223	0.0539
Мончегорск	0.0562	0.0553	0.0239	0.0568
Ловозеро	0.0487	0.0685	0.0185	0.0454
Кандалакша	0.0571	0.0521	0.0188	0.0457
Умба	0.0645	0.0567	0.0245	0.0486

Таблица 1. Скорость изменения сезонных температур на г. Ловчорр и на ближайших равнинных ГМС, °C/год

За исключением зимних месяцев, когда дисперсия температуры на г. Ловчорр ниже, чем на равнинных станциях, условия применимости критерия Тьюки (нормальность распределения данных и однородность групповых дисперсий) выполняются. Однако, учитывая, что устойчивость к отклонению от этих условий, равно как и статистическая мощность критерия Тьюки, возрастают при одинаковом числе наблюдений во всех сравниваемых группах [Zar, 2009], а выборки достаточно большие, его применение возможно и для зимнего сезона.

Нулевая гипотеза (углы наклона одинаковы) отклоняется, если $q > q_{\alpha, m, n-m}$, где $q_{\alpha, m, n-m}$ – значение статистики q для уровня значимости α и $m, n-m$ степенями свободы (m – число групп, n – их суммарная численность). Рассчитанные q и табличные значения $q_{\alpha, m, n-m}$ для каждой пары сравниваемых станций представлены в табл. 2. Несмотря на то, что углы наклона линейных трендов для выбранных пунктов численно отличаются (табл. 1), статистически значимого различия нет в одном из сезонов и ни в одной из сравниваемых пар. Можно считать скорости потепления на г. Ловчорр и на ближайших равнинных станциях в период 1965–2015 гг. практически одинаковыми. Это потепление можно выразить общей скоростью 0.52°C/10 лет для зимы, 0.57 °C/10 для весны, 0.22°C/10 для лета, 0.50°C/10 для осени.

Таблица 2. Сравнения углов наклона линейных трендов сезонных температур на г. Ловчорр и на ближайших равнинных ГМС (обозначения в тексте)

Зима					Весна				
Сравнение	$b_1 - b_2$	SE	q	$q_{\alpha, m, n-m}$	Сравнение	$b_1 - b_2$	SE	q	$q_{\alpha, m, n-m}$
Умба - Ловчорр	0.0305	0.0169	1.8048	3.8860	Ловозеро - Ловчорр	0.0171	0.0121	1.4081	3.8860
Кандалакша - Ловчорр	0.0232	0.0169	1.3683	3.8860	Умба - Ловчорр	0.0052	0.0121	0.4321	3.8860
Мончегорск - Ловчорр	0.0223	0.0169	1.3149	3.8860	Мончегорск - Ловчорр	0.0038	0.0121	0.3158	3.8860
Ловозеро - Ловчорр	0.0148	0.0169	0.8753	3.8860	Кандалакша - Ловчорр	0.0007	0.0121	0.0550	3.8860
Умба - Ловозеро	0.0157	0.0169	0.9295	3.8860	Ловозеро - Кандалакша	0.0164	0.0121	1.3531	3.8860
Кандалакша - Ловозеро	0.0083	0.0169	0.4930	3.8860	Умба - Кандалакша	0.0046	0.0121	0.3772	3.8860
Мончегорск - Ловозеро	0.0074	0.0169	0.4396	3.8860	Мончегорск - Кандалакша	0.0032	0.0121	0.2608	3.8860
Умба - Мончегорск	0.0083	0.0169	0.4899	3.8860	Ловозеро - Мончегорск	0.0133	0.0121	1.0923	3.8860
Кандалакша - Мончегорск	0.0009	0.0169	0.0534	3.8860	Умба - Мончегорск	0.0014	0.0121	0.1164	3.8860
Умба - Кандалакша	0.0074	0.0169	0.4365	3.8860	Ловозеро - Умба	0.0118	0.0121	0.9759	3.8860
Лето					Осень				
Сравнение	$b_1 - b_2$	SE	q	$q_{\alpha, m, n-m}$	Сравнение	$b_1 - b_2$	SE	q	$q_{\alpha, m, n-m}$
Умба - Ловозеро	0.0060	0.0113	0.5353	3.8860	Мончегорск - Ловозеро	0.0114	0.0125	0.9170	3.8860
Мончегорск - Ловозеро	0.0054	0.0113	0.4810	3.8860	Ловчорр - Ловозеро	0.0085	0.0125	0.6812	3.8860
Ловчорр - Ловозеро	0.0038	0.0113	0.3347	3.8860	Умба - Ловозеро	0.0032	0.0125	0.2588	3.8860
Кандалакша - Ловозеро	0.0003	0.0113	0.0287	3.8860	Кандалакша - Ловозеро	0.0003	0.0125	0.0225	3.8860
Умба - Кандалакша	0.0057	0.0113	0.5066	3.8860	Мончегорск - Кандалакша	0.0112	0.0125	0.8946	3.8860
Мончегорск - Кандалакша	0.0051	0.0113	0.4523	3.8860	Ловчорр - Кандалакша	0.0082	0.0125	0.6587	3.8860
Ловчорр - Кандалакша	0.0034	0.0113	0.3060	3.8860	Умба - Кандалакша	0.0029	0.0125	0.2364	3.8860
Умба - Ловчорр	0.0023	0.0113	0.2006	3.8860	Мончегорск - Умба	0.0082	0.0125	0.6582	3.8860
Мончегорск - Ловчорр	0.0016	0.0113	0.1463	3.8860	Ловчорр - Умба	0.0053	0.0125	0.4223	3.8860
Умба - Мончегорск	0.0006	0.0113	0.0543	3.8860	Мончегорск - Ловчорр	0.0029	0.0125	0.2359	3.8860

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. Действительно, в Хибинах отсутствует снеговая линия (нет зоны с круглогодичным залеганием снежного покрова), нет ярусов, которые находятся преимущественно ниже или выше основного облачного слоя, а разность температур и влагосодержания между вершинами и нижним ярусами небольшая из-за малого перепада высот. Из-за небольших горизонтальных размеров и высот (горизонтальные размеры массива 40 на 50 км, а абсолютные отметки высот 900–1200 м н.у.м.) Хибинский массив не создает непреодолимого барьера для переноса воздушных масс. Здесь нет орографического анти- и циклогенеза, а массив не является разделом климатических зон, как это часто имеет место в крупных горных системах. Именно потому все изменения, вызванные макромасштабными процессами в тропосфере, в горах и на ближайших равнинах оказываются в сильной корреляции.

В последние десятилетия в климатологии активно используются результаты проектов реанализов для исследования трендов температуры свободной атмосферы. Представляет практический интерес сопоставить

их результаты с данными наблюдений на г. Ловчорр, так как последние в такие реанализы не включались. Воспользуемся данными реанализа NCER/NCAR с 1948 г. на ближайших к вершине г. Ловчорр уровнях 925 и 850 гПа.

Корреляция между сезонными температурами на г. Ловчорр и на уровнях 925 и 850 гПа по данным реанализа очень высока: 0.975, 0.976, 0.958 и 0.978 для уровня 925 гПа для зимы, весны, лета и осени соответственно. На уровне 850 гПа коэффициенты корреляции соответственно 0.960, 0.974, 0.969, и 0.979. На рис. 2 видно, что данные реанализа NCER/NCAR хорошо воспроизводят наблюдающиеся колебания сезонных температур и их долговременные изменения (в том числе и восстановленный ряд на г. Ловчорр до 1948 г.). Линейные тренды рядов с 1965 г. имеют одинаковые углы наклона (проверено по методике, изложенной выше). Это позволяет предположить, что современное потепление в регионе имеет одинаковую скорость в слое от поверхности земли до высоты, как минимум, 1300 м. Однако, из-за использования данных реанализа вместо данных о фактической температуре свободной атмосферы над Хибинами, данный вывод следует принимать осторожно.

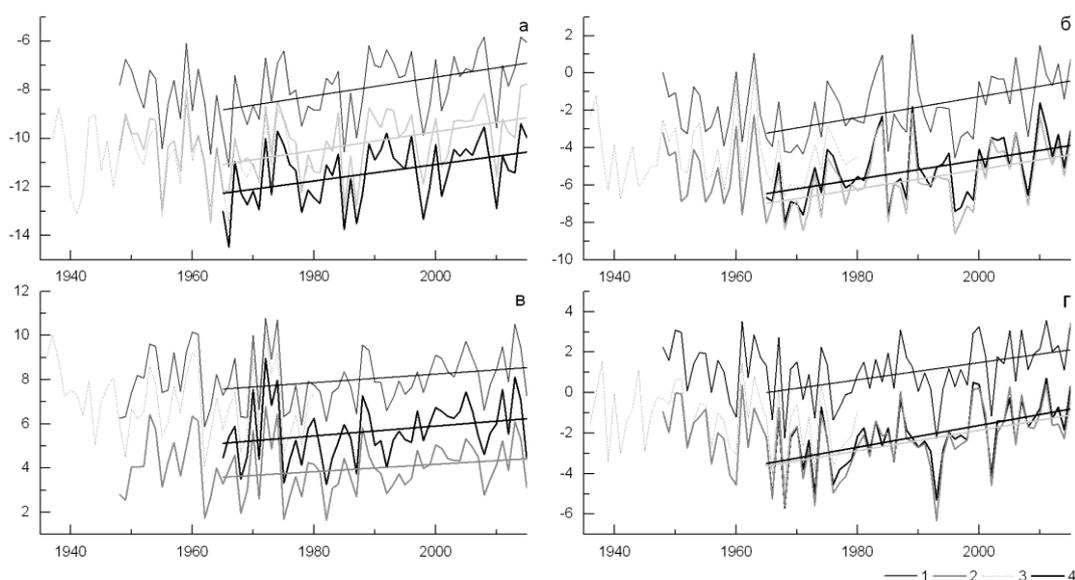


Рисунок 2. Динамика сезонных температур на г. Ловчорр: фактические с 1965 г. (1) и восстановленные в период 1936-1964 г. (2), и по данным реанализа на уровнях 925 (3) и 850 (4) гПа. Линейные тренды с 1965 г.

Заключение

Рассмотрены изменения температуры воздуха на г. Ловчорр (1091 м н.у.м.) – одной из самых высоких вершин в Хибинах – и на ближайших ГМС, расположенных на равнине, в период с 1965 по 2015 гг. Потепление на г. Ловчорр и равнинных ГМС обнаруживается во все сезоны. При сравнении линейных регрессий, отражающих тренд средних 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 потепления в слое от поверхности до верхнего яруса Хибинский гор.

Список литературы

- Лобанов В.А., Жильцова Е.Л., Лемешко Н.А. и др. Восстановление многолетних рядов температуры на европейской территории России //Метеорология и гидрология. 2005.№ 2. стр. 5-14.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменение климата. М., Росгидромет., НИЦ «Планета» 2008. 230 с.
- Maxwell Scott E, Harold D. Designing Experiments and Analyzing Data: A Model Comparison Perspective Series. Lawrence Erlbaum Associates. 2004. 1104 p.
- Zar H.J. Biostatistical Analysis. New Jersey: Pearson, 2009. 946 p.