

# ВЛИЯНИЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАСЧЕТЫ ГОРОДСКОГО «ОСТРОВА ТЕПЛА» И ТРЕНДЫ ТЕМПЕРАТУРЫ В МУРМАНСКЕ

*В.И. Демин<sup>1</sup>, А.Р. Анциферова<sup>2</sup>, О.М. Чаус<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты*

*<sup>2</sup>Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Мурманск  
demин@pgia.ru, klimat@kolgimet.ru*

## Введение

На Кольском п-ове последние десятилетия XX века и начало XXI века характеризуются значительными изменениями климатических параметров. Если исходить из базового периода 1961–1990 гг., то за последние 26 лет (1991–2016 гг.) климатическая норма среднегодовой температуры в г. Мурманске была превышена в 24 случаях. Это говорит о быстром потеплении климата в городе; с другой стороны, возникает вопрос: в какой степени это потепление вызвано глобальными и региональными процессами, а в какой – техногенным (тепловым) воздействием города. Эти изменения фиксируются на гидрометеорологической станции (ГМС) «Мурманск», расположенной в черте города с более чем 300 тыс. населением (самый крупный город за полярным кругом).

Целью данной работы является оценка репрезентативности метеорологических наблюдений на городской ГМС «Мурманск» для анализа климатических изменений. Ее актуальность обусловлена присутствием ГМС «Мурманск» в сети Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК), а также в связи с опубликованным [14] сообщением о существовании в Мурманске «острова тепла» интенсивностью до 3 °С, захватывающего и район расположения ГМС.

Надо сказать, что вопрос о качестве городских метеорологических наблюдений является довольно острым. Городское строительство всегда сопровождается существенным изменением радиационных, термических, влажностных и аэродинамических характеристик ландшафта, а в процессах жизнедеятельности потребляется большое количество тепловой и электрической энергии с ее последующим выделением в атмосферу. Как следствие, обусловленный антропогенным фактором «остров тепла» в той или иной степени должен обнаруживаться во всех (даже небольших) городах и как составляющая содержится в количественных показателях климатических изменений. Однако практическая оценка интенсивности городских «островов тепла» и их роли в тепловом балансе территории является непростой задачей.

### **Исходные данные**

В работе использованы данные измерений приземной температуры в период 1935–2015 гг. на гидрометеорологических станциях Мурманской области (Мурманское управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) и данные, предоставленные ВНИИ Гидрометеорологической информации (г. Обнинск).

### **Метод исследования**

Традиционный метод обнаружения городского «острова тепла» основан на сравнении измерений внутри города и в ближайшей сельской местности. Метеорологические наблюдения в большинстве российских городов осуществляются всего на одной ГМС, а в качестве ближайших фоновых приходится использовать ГМС, удаленные на десятки и даже сотни километров. Например, в [9] удаление фоновых станций от городов достигало 100 км.

Оценка интенсивности «острова тепла» проводится по разности между температурой воздуха на метеостанции, расположенной в городе, и температурой воздуха на метеостанции, расположенной за городом. Положительный знак разности, как правило, интерпретируют как проявление городского «острова тепла». Однако такой подход едва ли можно признать обоснованным. Городской «остров

тепла» является следствием процесса урбанизации территории и рассматривается как один из самых наглядных примеров мезомасштабного изменения климата в результате деятельности человека [7]. В то же время неоднородности в поле температуры на территории города могут возникать не только из-за техногенного воздействия, но и по естественным причинам. Многочисленные полевые исследования показывают, что основные климатические показатели из-за особенностей микроклимата на близких расстояниях могут изменяться сильнее, чем даже при переходе из одной климатической зоны в другую [2]. Существует проблема выделения из множества факторов, определяющих пространственные изменения температуры воздуха, воздействия именно городской среды. Ее решение является непростой, но необходимой задачей. В противном случае масштаб антропогенного воздействия на тепловой режим приземного слоя воздуха в городе окажется искаженным, а за антропогенный «остров тепла» будет выдано другое явление [13].

### **Результаты и обсуждение**

Простое сопоставление измерений на ГМС «Мурманск» с измерениями на ближайшей фоновой ГМС с целью обнаружения положительной разности температур невозможно. Во-первых, Мурманск находится вблизи границы суши и моря, где наблюдаются значительные горизонтальные градиенты температуры, из-за которых город оказывается теплее одних фоновых районов и холоднее относительно других. Даже северные и южные районы города из-за его большой меридиональной протяженности (20 км) оказываются в разных климатических условиях, так как находятся на разном удалении от акватории Баренцева моря, оказывающего сильное влияние на термический режим прибрежных территорий [6]. Определенную роль играет и положение города на берегу глубоко врезающегося в сушу незамерзающего Кольского залива. Известно, например, его охлаждающее воздействие в летний период: после переноса метеорологической площадки из центральной части города на берег Кольского залива даже среднемесячные температуры воздуха по отношению к предыдущему ряду наблюдений понизились почти на 1 °С [5].

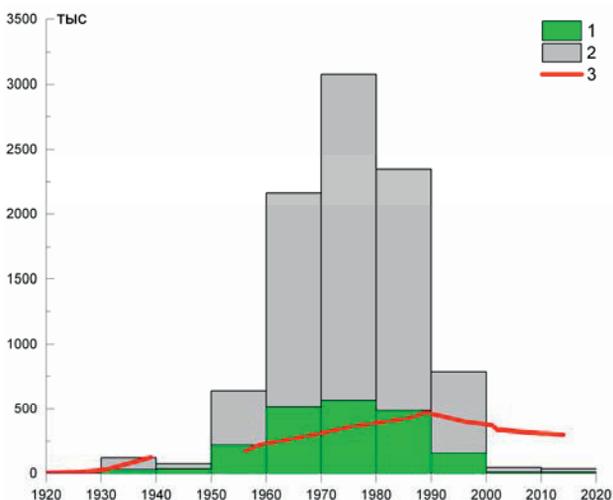
На территории Мурманска и вокруг него наблюдается очень сложный холмистый рельеф. Минимальные высоты соответствуют уровню моря, а максимальные превышают 300 м. Из-за стоковых течений в холодное полугодие (а ночью и во все сезоны) происходит перераспределение холодного воздуха с появлением теплых областей на возвышенных участках и «озер холода» в понижениях. По результатам измерений, проводимых с 2014 г., в фоновых районах Кольского п-ова разность температур между верхними частями холмов и окружающего его равнинами даже в условиях слабовсхолмленного района с относительными превышениями высот 20–50 м может достигать 5–15 °С зимой и доходить в отдельных случаях до 5–8 °С летом [3].

Чтобы не выдать за антропогенный «остров тепла» в Мурманске естественные пространственные вариации температуры, создаваемые неоднородной подстилающей поверхностью и сложным рельефом, необходимо проводить сравнение ГМС, расположенных на территориях с одинаковым микроклиматом. В условиях редкой сети ГМС это не всегда оказывается возможным.

В случае локальной точки – метеорологической площадки ГМС «Мурманск» – задача несколько упрощается. Благодаря тому, что с 1935 г. ее положение не изменилось (57 м н.у.м., Халдеев мыс), можно отследить долговременную эволюцию городского «острова тепла». Действительно, одной из главных причин формирования «острова тепла» является большая площадь всевозможных искусственных поверхностей (здания, дороги и т. д.), радиационные и теплофизические свойства которых отличаются от характерных для данного ландшафта. По этой причине «остров тепла» усиливается вместе с растущим городом. На практике это связь отражается в виде ряда статистических зависимостей между интенсивностью «острова тепла» и числом жителей в городе или его геометрическими характеристиками (горизонтальные размеры, индекс открытости небосвода, соотношение ширины и высоты уличных каньонов и т. д.) [7].

Строительство Мурманска началось в 1915 году. Во время Великой Отечественной войны преимущественно деревянный город был полностью сожжен (остались отдельные каменные здания) и с 1944 г. его отстраивали заново. Значительное расширение

территории Мурманска пришлось на 1970-е – начало 1980-х гг. (рис. 1). В 1989 г. население города достигло 470 тыс. чел. С начала 1990 гг. последовал сильный экономический спад, снижение объемов промышленного производства, строительства, потребления тепло- и электроэнергии, значительный отток населения. Если исходить из данной динамики, можно предположить, что интенсивность «острова тепла» в Мурманске усиливалась к 1990-м гг., а в дальнейшем изменялась слабо. Процесс должен проявиться по увеличивающейся со временем (по мере роста города) разности показаний городской и фоновой ГМС.



**Рис. 1. Динамика общего числа построенных домов (1) в Мурманске с указанием суммарной площади по годам (2) и числа жителей (3).**

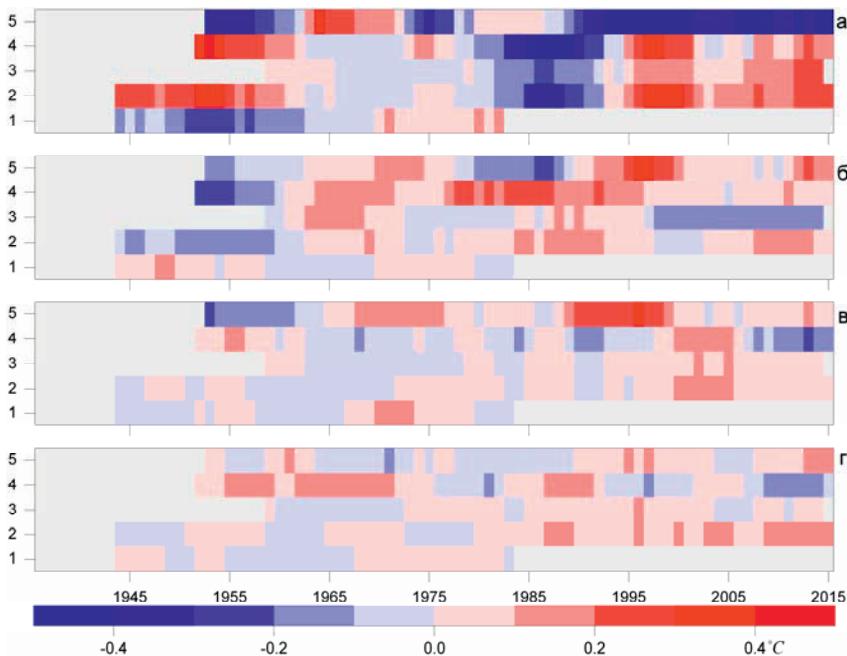
Ближайшей к Мурманску фоновой станцией является ГМС «Полярное» (рис. 2). С 1913 г. она расположена на пустынном Екатерининском острове в Кольском заливе в 30 км к северу (высота 32 м н.у.м.). С 1878 по 1983 г. работала находившаяся в 8 км южнее ГМС «Кола» (5 м н.у.м.). Несмотря на ее закрытие, данные представляют интерес, так как на период наблюдений пришлось

годы самого интенсивного роста города. С 1950 г. для сравнения могут быть использованы данные фоновой ГМС «Ура-Губа» (27 м н.у.м.), удаленной на 38 км к СЗ от ГМС «Мурманск», ГМС «Падун» (в 63 км к ЮЗ; 63 м н.у.м.) и ГМС «Териберка» (88 км на СВ; 33 м н.у.м.).



**Рис. 2. Схематическое расположение гидрометеорологических станций вблизи Мурманска.**

Разность температур между выбранными ГМС меняет знак в зависимости от их географического положения и сезона (динамика разностей сезонных температур в виде аномалий от их средних значений за период 1951–1980 гг. представлена на рис. 3). Например, зимой, благодаря близости к незамерзающей акватории Баренцева моря, в Полярном теплее, чем в Мурманске, летом — наоборот. По этой причине, чтобы представить изменения на одном рисунке с помощью одной цветовой шкалы, лучше оперировать не абсолютной разностью температур, а отклонением этой разности от среднего значения. Выделение сезонов на Кольском п-ове: зима — ноябрь-март, весна — апрель и май, лето — июнь-август, осень — сентябрь и октябрь [12].



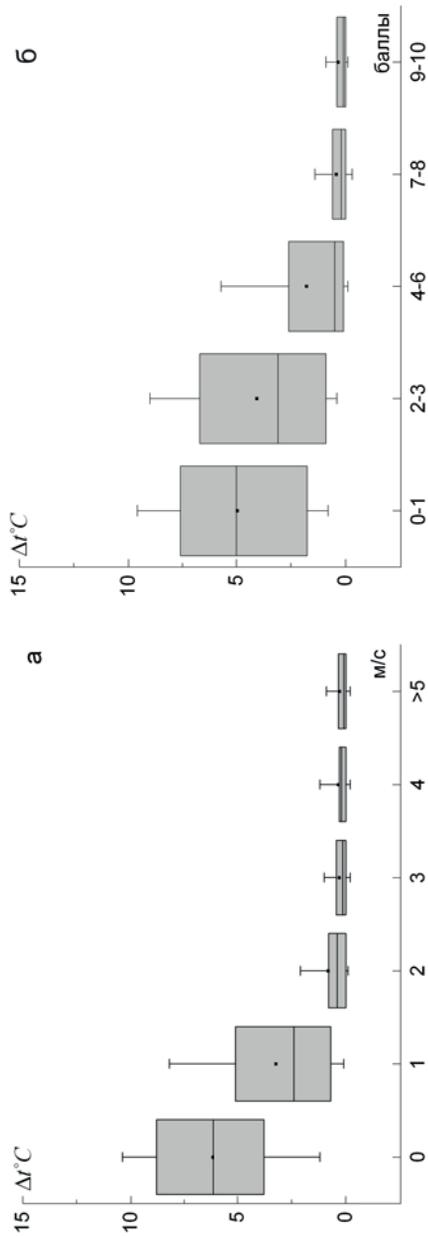
**Рис. 3. Аномалии разностей сезонных температур (от их средних значений разностей за период 1951–1980 гг.) после 10-летнего сглаживания: 1 – ГМС «Мурманск» и «Кола»; 2 – ГМС «Мурманск» и «Полярное»; 3 – ГМС «Мурманск» и «Ура-Губа»; 4 – ГМС «Мурманск» и «Падун», 5 – ГМС «Мурманск» и «Териберка»; зима (а), весна (б), лето(в), осень (г).**

Как видно (рис. 3), ни в одном из сезонов не наблюдается монотонного увеличения разностей между ГМС «Мурманск» и фоновыми ГМС: существуют многолетние периоды с их увеличением (на ГМС «Мурманск» становится теплее) и уменьшением (на ГМС «Мурманск» становится холоднее). Значение тренда меняется от выбранного временного интервала. При этом тренды могут быть разнонаправленными: существуют многолетние периоды, когда в Мурманске становится теплее относительно одной станции и холоднее относительно другой. Например, зимой к середине 1980-х гг. на ГМС «Мурманск» потеплело относительно ГМС

«Кола», но похолодало относительно ГМС «Полярное» и «Ура-Губа». Весной на ГМС «Мурманск» становится теплее относительно ГМС «Полярное» и одновременно холоднее относительно ГМС «Ура-Губа». Между тем, если бы в Мурманске становилось теплее из-за городского «острова тепла», все изменения в рассматриваемых парах происходили бы синхронно.

Неоднозначный результат говорит о том, что воздействие города на тепловой режим в окрестностях ГМС «Мурманск» незначительное по величине и сильно искажается естественными вариациями температуры, создаваемыми изменениями в макроциркуляционном режиме. Известно, что в общей циркуляции атмосферы существуют периоды, когда повторяемость одного из макропроцессов или их группы макропроцессов заметно превышает свои многолетние значения – так называемые циркуляционные эпохи. Их продолжительность составляет от 10 до 30 лет (по Г.Я. Вангейнгейму) и 25–30 лет по Б.Л. Дзердзеевскому [11]. Каждой эпохе соответствуют температурные аномалии определенной географической локализации. Разное положение сравниваемых ГМС относительно зон крупных аномалий должно оказывать влияние на временной ход разности температур между ними. На небольших расстояниях влияние данного фактора незначительное, хотя, если речь идет об обнаружении слабых эффектов, его нельзя игнорировать.

Однако более важно, на наш взгляд, что смена доминирующих макроциркуляционных процессов сопровождается изменениями в повторяемости типов погоды. Микроклимат по-разному проявляется в разных погодных условиях. Для иллюстрации на рис. 4 показана зависимость от скорости ветра и облачности разности температур между автоматической метеорологической станцией, установленной в г. Апатиты («Академгородок»), и на ГМС «Апатиты». Несмотря на то, что ГМС удалены друг от друга менее чем на 3 км, разность температур значительно меняется в зависимости от погоды. Город Апатиты расположен в верхней части обширного холма, в то время как ГМС «Апатиты» находится у его подножия. В ясную тихую погоду стекающий с холмов холодный воздух формирует в районе ГМС «Апатиты» «озеро холода», из-за которого возникает большой градиент температуры.

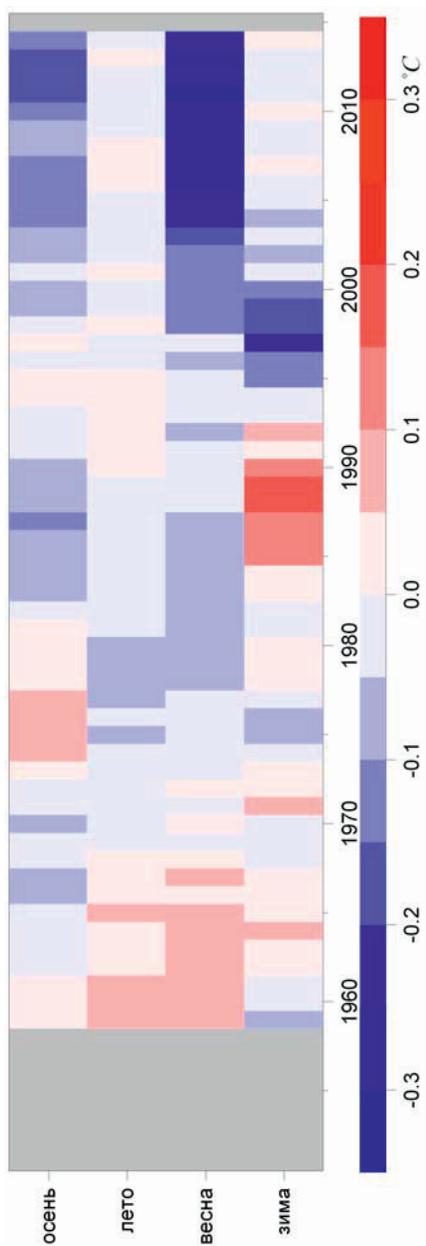


**Рис. 4.** Разность температур между «Академгородком» и ГМС «Апатиты» в зависимости от скорости ветра (а) и от количества нижней облачности на ГМС «Апатиты» (б).  
**На** бокс-диаграммах прямоугольниками выделена область, заключенная между первым (25 %) и вторым (75 %) квантилями; выносными линиями отмечена область 10–90 %, проведена медиана — прямая линия, среднее значение отмечено маркером.

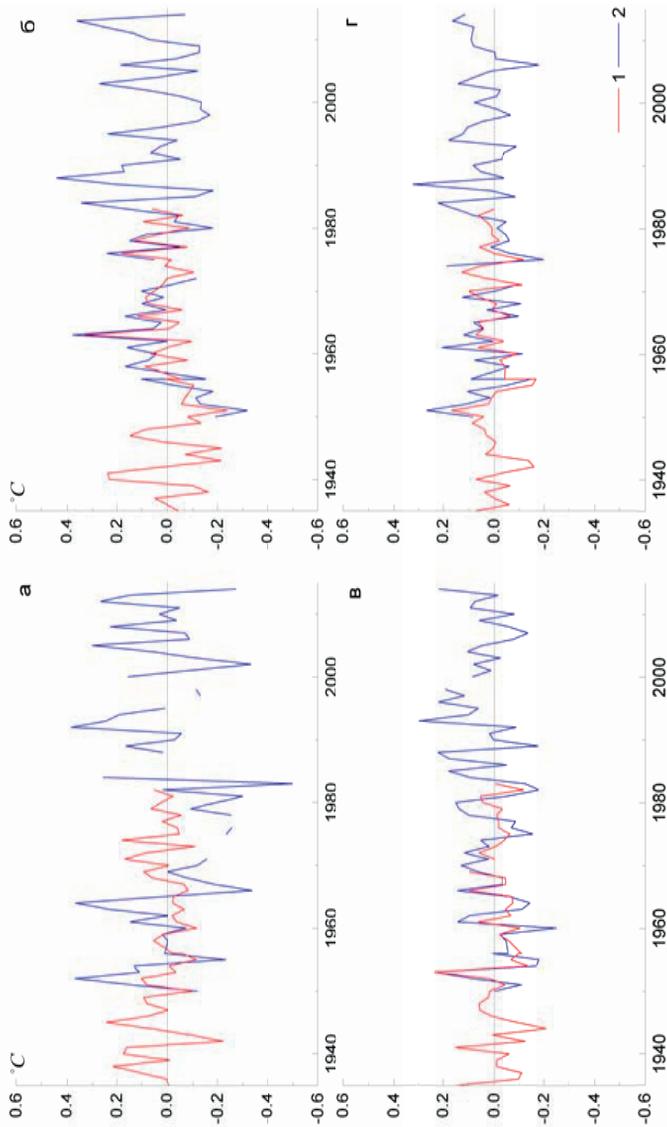
При усилении ветра турбулентное перемешивание выравнивает распределение температуры. Плотная облачность уменьшает радиационное выхолаживание. В последние десятилетия скорость ветра на подавляющем большинстве станций, расположенных на севере ЕТР, в том числе и на Кольском п-ове, уменьшается [1, 4]. В случае г. Апатиты такое уменьшение приведет к увеличению разности температур между ГМС, расположенными в городе и за его пределами, что без учета микроклимата будет интерпретировано как усиление городского «острова тепла». Таким образом, изучение эволюции «острова тепла» требует сравнения ГМС, расположенных в схожих по микроклимату условиях.

Существование периодов, когда разность температур между довольно близко расположенными ГМС получает тренд, можно показать на примере фоновых ГМС «Ура-Губа» и «Полярное» (расстоянии между ними около 30 км). На рис. 5 видно, что в период с 1950 г. на ГМС «Полярное» весной и осенью похолодало относительно ГМС «Ура-Губа». Такие же вариации, не связанные с техногенным воздействием, могут существовать и в разности между городской и фоновой ГМС. Например, если бы мы ограничились сопоставлением ГМС «Мурманск» и ближайшей к ней фоновой ГМС «Полярное», то пришли бы к заключению, что с 1935 г. весной и осенью в городе стало несколько теплее (рис. 3). Однако после добавления к анализу фоновой ГМС «Ура-Губа» причина такого потепления становится неочевидной: оно могло быть вызвано как дополнительным (антропогенным) потеплением в Мурманске, так и похолоданием в Полярном.

Очевидно, что усиление интенсивности «острова тепла» должно проявиться в виде одновременного потепления относительно всех окружающих город фоновых ГМС. В период 1935–1983 гг. можно рассмотреть среднюю разность температур в парах ГМС «Мурманск» – «Кола» и «Мурманск» – «Полярное», а в период 1950–2015 гг. в разностях ГМС «Мурманск» с ГМС «Полярное», «Ура-Губа», «Падун», «Териберка». Средние аномалии приведены на рис. 6: ни в период 1935–1983 гг., ни в период 1950–2015 гг. на городской ГМС «Мурманск» не стало теплее относительно выбранных фоновых районов.



**Рис. 5.** Аномалии разностей сезонных температур на ГМС «Полярное» и «Ура-Губа» (от средних значений за период 1951–1980 гг.) после 10-летнего сглаживания.



**Рис. 6. Среденные по группам аномалии разностей температур (от средних разностей за период 1951–1980 гг.): 1 – ГМС «Мурманск» и «Полярное»; «Мурманск» и «Кола»; 2 – «Мурманск» и «Полярное», «Мурманск» и «Ура-Губа», «Мурманск» и «Надун», «Мурманск» и «Териберка»; зима (а), весна (б), лето (в), осень (г).**

В качестве характеристики климатических изменений принято использовать угловой коэффициент в уравнении линейного тренда температуры, определенный по методу наименьших квадратов (МНК) [8]. Значения данных коэффициентов для трендов средних сезонных температур на ГМС «Мурманск» и ближайших к ней фоновых ГМС в период 1950–2015 гг. приведены в таблице. Численно они отличаются. Однако в МНК коэффициенты уравнения регрессии определяются с некоторой погрешностью. По этой причине в математической статистике существует процедура сравнения углов наклона регрессий (см, например, [10]). Эта процедура является необходимой еще и потому, что климатические архивы нередко содержат ошибочные значения, которые не выглядят выбросами и не выявляются при первичной проверке. Такие технические ошибки в исходных данных могут сказаться на расчете коэффициентов линейных регрессий. Их численному различию будет необоснованно придан физический смысл.

Процедура сравнения наклонов нескольких регрессий приведена в [15]. По всем уравнениям регрессий вычисляется объединенная остаточная оценка дисперсии  $SS_p$ , а по уравнению регрессии, построенному по объединенной выборке, рассчитывается остаточная регрессия  $SS_c$ . 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  $DF_p = \sum_{i=1}^k (n_i - 2)$ . Нулевая гипотеза (углы наклона равны  $b_1 = b_2 = \dots = b_k$ ) отвергается, если  $F > F_{кр}$ .

Результаты расчета приведены в таблице. Во всех случаях уровень значимости  $p$  принимает довольно большие значения, чтобы можно было отвергнуть гипотезу о совпадении углов наклона. Линии регрессии для выбранных ГМС параллельны, а скорости

потепления в период 1950–2015 гг. следует считать одинаковыми: 0,0247, 0,0293, 0,0055 и 0,0211 °C/год для зимы, весны, лета и осени соответственно (для лета тренд статистически незначим).

Таблица

**Сравнения углов наклона линейных трендов сезонных температур на Кольском п-ове в период 1950–2015 гг. (обозначения в тексте)**

ГМС	зима		весна		лето		осень	
	<i>b</i>	<i>SS</i>	<i>b</i>	<i>SS</i>	<i>b</i>	<i>SS</i>	<i>b</i>	<i>SS</i>
Мурманск	0,0247	206,2127	0,0299	139,6777	0,0066	102,4741	0,0219	126,0333
Полярное	0,0218	131,5004	0,0273	124,5795	0,0045	102,7878	0,0192	111,7557
Ура-Губа	0,0201	179,8936	0,0304	141,8520	0,0060	99,6935	0,0197	122,9391
Падун	0,0329	270,6981	0,0305	129,5160	0,0034	102,0221	0,0200	133,8530
Териберка	0,0240	127,6399	0,0284	133,1406	0,0068	123,0531	0,0247	98,2966
SSp	****	915,9448	****	668,7659	****	530,0306	****	592,8778
SSc	0,0247	918,2286	0,0293	668,9524	0,0055	530,2334	0,0211	593,3678
****	нулевая гипотеза: все углы наклона одинаковы							
	$F(4,313) = 0,1951$		$F(4,317) = 0,0221$		$F(4,318) = 0,0304$		$F(4,318) = 0,0657$	
	$p = 0,9409$		$p = 0,9990$		$p = 0,9982$		$p = 0,9920$	

Полученный результат, безусловно, не может рассматриваться как отрицание возможности существования в г. Мурманске «острова тепла». Можно уверенно говорить лишь о незначительном влиянии города на тепловой режим в окрестностях ГМС «Мурманск». Это может быть вызвано как локальными особенностями положения ГМС «Мурманск» (небольшая повторяемость сочетания благоприятных метеорологических условий, способствующих проявлению «острова тепла»), так и его общей слабой интенсивностью. Вместе с тем, использованный в работе метод не дает ответа на вопрос об отсутствии «острова тепла» в других районах города, не освещенных регулярными метеорологическими наблюдениями. Так, например, используя полевые измерения температуры на территории города зимой 2014 г., авторами работы [14] сделан вывод о существовании в г. Мурманск «острова тепла» интенсивностью до 3 °C, который захватывает и район ГМС «Мурманск». К сожалению, этот результат был получен сравнением короткой серии измерений в пунктах, расположенных в разных

геоморфологических условиях, и без учета естественной микроклиматической изменчивости температуры, которая в условиях города из-за сложного рельефа и неоднородной подстилающей поверхности может быть значительной. По этой причине нельзя говорить об антропогенном характере обнаруженных аномалий в поле температуры и вопрос о существовании «острова тепла» в других районах Мурманска (кроме территории ГМС «Мурманск») следует считать открытым до проведения масштабного комплекса микроклиматических измерений в городе и в схожих по ландшафту фоновых районах.

### **Заключение**

Исследована динамика разностей сезонных температур между городской ГМС в Мурманске и ближайшими фоновыми ГМС «Кола», «Полярное», «Ура-Губа», «Падун», «Териберка». Увеличения температуры в городе одновременно по отношению ко всем фоновым ГМС, несмотря на значительный рост города, не обнаружено.

Статистически значимой разницы в углах наклона линейных трендов сезонных температур на всех выбранных станциях нет. Скорости потепления можно считать одинаковыми. Измерения на ГМС «Мурманск», несмотря на положение внутри крупного города с более чем 300–тысячным населением, можно считать репрезентативными для задач региональной и глобальной климатологии.

Показано, что в разности температур между близко расположенными ГМС присутствуют многолетние периоды, когда она увеличивается или уменьшается в зависимости от характера доминирующих макроциркуляционных процессов и особенностей микроклимата в местах расположения ГМС. Это обстоятельство необходимо учитывать, если оценка интенсивности городского «острова тепла» проводится сравнением показаний городских и фоновых ГМС, находящихся в разных микроклиматических условиях.

### **Список использованных источников**

1. Баранова А. А., Голод М. П., Мещерская А. В. Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века // Труды ГГО. – Вып. 556. – С. 116–138.

2. *Гольцберг И.А.* Микроклимат СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 282 с.
3. *Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В.* Влияние рельефа на формирование «острова тепла» в г. Апатиты // *Фундаментальная и прикладная климатология.* –2016. – № 2. – С. 95–106.
4. *Климат России / Под ред. Н.В. Кобышевой.* – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 654 с.
5. *Климатологический справочник СССР. Выпуск 1. Метеорологические данные за отдельные годы. Часть 1. Температура воздуха.* – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 562 с.
6. *Мищенко З.А.* Биоклимат дня и ночи. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.
7. *Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 360 с.
8. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменение климата.* – М.: Росгидромет; НИЦ «Планета», 2008. – 230 с.
9. *Танский А.О., Мазуров Г.И.* Анализ острова тепла над некоторыми городами Российской Федерации // *Метеорологический вестник.* – 2010. – Том 3. – С. 80–122.
10. *Хальд А.* Математическая статистика с техническими приложениями. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 664 с.
11. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
12. *Яковлев Б.А.* Климат Мурманской области. – Мурманск: Мурманское кн. изд., 1961. –180 с.
13. *Stewart I. D.* A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // *Int. J. Climatol.* – doi: 10.1002/joc.2141.
14. *Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Repina I.A., Samsonov T.E., Baklanov A.A.* Experimental research of urban heat island effect for the biggest arctic cities // *Arctic Frontiers: Industry and Environment.* Tromsø, Norway 24–29 January 2016. URL: <http://www.arcticfrontiers.com/downloads/arctic-frontiers-2016/presentations-4/poster-presentations-6/1249-3235531-mikhail-varentsov/file>.
15. *Zar H.J.* Biostatistical Analysis. – New Jersey: Pearson, 2009. – 946 p.

*Поступила в редакцию 03.03.2017 г.*