РОЛЬ РЕЛЬЕФА В ВОЗНИКНОВЕНИИ «ОСТРОВА ТЕПЛА» В ГОРОДЕ АПАТИТЫ

*В.И. Демин*¹⁾, *Б.В. Козелов*¹⁾, *Н.И. Елизарова*²⁾, *Ю.В. Меньшов*³⁾,
*П.И. Константинов*⁴⁾

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

²⁾ АМСГ «Апатиты» СЗФ ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Аэропорт г. Апатиты;
apatity@aviamet-szf.ru

³⁾ Территориально-ситуационный центр ФКУ Упрдор «Кола»,
Россия, 185035, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Антикайнена, д. 1а;
cou@fad.karelia.ru

⁴⁾ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1; *kostadini@mail.ru*

Резюме. При сравнении данных измерений температуры воздуха в г. Апатиты (Мурманская область) и на ближайших фоновых метеорологических станциях обнаружено, что воздух внутри городской застройки теплее, чем в окрестностях. Однако более высокие температуры в городе возникают за счет положения города в верхней части холма. Обнаруженная разница температур не превышает диапазон ее естественной микроклиматической изменчивости в условиях холмистого рельефа. Это не позволяет до проведения дополнительных исследований рассматривать явление как результат антропогенного воздействия на тепловой режим приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова. Климат города, городской остров тепла, микроклимат.

THE ROLE OF RELIEF IN THE HEAT ISLAND PHENOMENON IN THE CITY OF APATITY

*V.I. Demin*¹⁾, *B.V. Kozelov*¹⁾, *N.I. Elizarova*²⁾, *Yu.V. Menshov*³⁾, *P.I. Konstantinov*⁴⁾

¹⁾ Polar Geophysical Institute,
26a, Academgorodok, , 84209 Apatity, Russia; *demin@pgia.ru*

²⁾ CAMS "Apatity", FSBE "Aviamettelecom of Roshydromet", North Western Branch,
Aeroport, 184209 Apatity, Russia; *apatity@aviamet-szf.ru*

³⁾ Territorial-situational center, Updror "Kola",
1a, Antikainen st., 185035 Republic of Karelia, Petrozavodsk, Russia; *cou@fad.karelia.ru*

⁴⁾ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Meteorology and Climatology,
1, Lenin Gory, 119991 Moscow, Russia; *kostadini@mail.ru*

Summary. A comparison of meteorological data from different sites showed that air temperatures in the city of Apatity are higher than those in its surroundings. However, elevated urban air temperatures may be caused by city location at the upper part of the hill. Detected difference in temperatures is within the range of nat-

ural microclimatic variations across the hilly area. This does not allow, prior to additional studies, to consider the heat island phenomenon as a result of the man-induced effect on thermal regime of the atmospheric surface layer.

Keywords. Urban climate, urban heat island, microclimate

Введение

В климатологии хорошо известно, что температура воздуха внутри городской застройки несколько выше, чем над окружающей сельской местностью: на границе города существует сильный температурный градиент с последующим медленным повышением температуры к центральной его части – так называемый городской «остров тепла». Интенсивность данного явления, оцениваемая как разность температур между центральной частью города и ближайшей сельской местностью, изменяется во времени и пространстве под влиянием метеорологических условий и характеристик города.

Согласно существующим представлениям формирование городского «острова тепла» происходит в результате:

1. большого поглощения коротковолновой радиации (в дневные часы) конструкциями зданий, покрытиями дорог и т.д.;
2. уменьшения эффективного излучения вследствие большей закрытости горизонта (меньше площадь открытого неба);
3. увеличения приходящей длинноволновой радиации из-за большего противоищлучения загрязненной городской атмосферы;
4. уменьшения затрат тепла на испарение почвой вследствие отведения воды канализационными системами;
5. уменьшения потерь тепла за счет ослабления турбулентного обмена по вертикали при меньшей скорости ветра в городе;
6. выделения антропогенного тепла (сжигание топлива, отопление, работа электрических установок и приборов и т.д.).

Как следует из приведенного списка, причиной возникновения «острова тепла» является модификация подстилающей поверхности застройкой, вызывающая изменение теплового баланса городской местности. В этой связи изучение городского «острова тепла» представляет значительный интерес, так как «острова тепла» являются одними из самых наглядных примеров мезомасштабного изменения климата в результате деятельности человека (Оке, 1982).

Целью данной работы является анализ вариаций температуры воздуха в г. Апатиты («Академгородок»), расположенного в центральной части Кольского п-ова, и на ближайших фоновых метеорологических станциях (ГМС). Интерес к проведению подобного исследования обусловлен тем, что ранее в г. Апатиты, несмотря на его небольшие размеры (58 тыс. жителей, немногим более 400 зданий), *был «выявлен интенсивный (до 3.2 °C) остров тепла, рассчитанный через температуру подстилающей поверхности», причем «его средняя интенсивность за период наблюдения заметно превышает*

характерные данные для городов Европы в зимний период» (процитировано по (Константинов и др., 2015; Konstantinov et al., 2015).

Примечательно, что эффект обнаружен зимой, когда радиационный баланс в регионе отрицательный и в районе города, где нет промышленных предприятий. Это предполагает, что дополнительный прогрев приземного слоя воздуха в г. Апатиты происходит только за счет рассеивания тепла, затраченного на обогрев помещений, и тепла, выделяемого при работе электрических приборов, автотранспорта и, наконец, метаболических процессов в организме человека.

Учитывая, что «остров тепла» в г. Апатиты в работах (Константинов и др., 2015; Konstantinov et al., 2015) обнаружен по довольно ограниченным материалам полевых измерений температуры воздуха и анализа спутниковых снимков теплового излучения подстилающей поверхности, которое нелинейно связано как с ее температурой, так и с температурой воздуха, а максимальная интенсивность явления оказалась очень высокой (до 10 °C), было интересно, как «остров тепла» проявляется в городе при регулярных метеорологических наблюдениях.

Методы и материалы

В 2014 году на территории Академгородка г. Апатиты на здании Полярного геофизического института была установлена автоматическая метеорологическая станция WP1400. Ее абсолютная отметка соответствует 200 м н.у.м. При регулярном сравнении показаний датчика температуры метеостанции с измерениями аспирационным психрометром, выполненными внизу на высоте 2 м от поверхности, заметной разницы между ними зимой не обнаружено (в среднем около 0.1 °C).

Данные метеостанции, расположенной в Академгородке (далее «Академгородок») – в «теплой» части г. Апатиты, согласно цитируемым выше работам (Константинов и др., 2015; Konstantinov et al., 2015), – были сопоставлены с измерениями температуры воздуха на авиационной метеорологической станции (АМСГ) «Апатиты» аэропорта «Хибины», удаленной на 15 км к ЮВ (160 м н.у.м.) и расположенной в 2.7 км к ЮЗ гидрометеорологической станции (ГМС) «Апатиты» (135 м н.у.м.).

Результаты и обсуждение

На декабрь-январь в регионе приходится период полярной ночи (15 – 28 декабря) и низкой освещенности, когда приток солнечной радиации отсутствует даже на вертикальные стены зданий. Суточный ход температуры воздуха в этот период не проявляется, а ее изменения в пунктах измерения в значительной степени синхронны, так как возникают, главным образом, за счет смены синоптической ситуации. Для примера на рис. 1 показаны вариации температуры воздуха в «Академгородке» и на АМСГ «Апатиты».

Вместе с тем, по результатам измерений зимой 2014 – 2015 и 2015 – 2016 гг. район «Академгородка» оказался в среднем на 1.4 °С теплее АМСГ «Апатиты», причем в отдельные моменты разность температур между «Академгородком» и АМСГ увеличивалась до 5 – 10°С. Ее максимальное зарегистрированное значение составило 13.7 °С. Распределение разностей температуры между «Академгородком» и АМСГ «Апатиты» представлено на рис. 2. Средняя температура декабря-января в «Академгородке» оказалась выше на 2.2 °С при сравнении с ГМС «Апатиты».

Рисунок 1. Вариации температуры воздуха на АМСГ «Апатиты» (1) и в «Академгородке» (2)

Рисунок 2. Распределение наблюдаемых разностей температур между «Академгородком» и АМСГ «Апатиты»

Рисунок 3. Разность температур между «Академгородком» и АМСГ «Апатиты» в зависимости от температуры воздуха на АМСГ «Апатиты».

Здесь и на последующих рисунках на бокс-диаграммах прямоугольниками выделена область, заключенная между первым (25%) и вторым (75%) квантилем; выносными линиями отмечена область 10-90%, проведена медианная линия и отмечено среднее значение в градусах(■)

Большая разность между «Академгородком» и пригородами возникает, главным образом, на фоне довольно низких температур в районе (рис. 3), в тихую и малооблачную погоду (рис. 4 – 5).

Рисунок 4. Разность температур между «Академгородком» и ГМС «Апатиты» в зависимости от скорости ветра на ГМС «Апатиты»

Рисунок 5. Разность температур между «Академгородком» и ГМС «Апатиты» в зависимости от количества нижней облачности (в баллах)

Наряду с преимущественно положительной разностью температур между центральной частью города и его пригородами, наблюдается и непродолжительные по времени периоды с отрицательной разностью. Их появление возможно в случаях неравномерного распределения облачности: если над городом наблюдается ясное небо, а в районе, например, АМСГ облачно, температура в городе из-за более интенсивного радиационного выхолаживания может оказаться ниже.

С одной стороны, более теплый по сравнению с периферийными районами центр города может действительно указывать на существование городского «острова тепла». Однако метеорологические условия, при которых появляется выраженная разница между городом и пригородами (зима, ясная и тихая погода), в точности совпадают с условиями, при которых в наибольшей степени проявляется микроклиматическая неоднородность территории.

Если посмотреть на топографическую карту, легко обнаружить, что г. Апатиты занимает верхнюю часть довольно обширного холма, примерно на 50 – 60 м возвышающегося над окрестностями (рис. 6). Плотная городская застройка начинается с отметок примерно 155 – 160 м, а центральная часть города расположена на высотах 180 – 200 м н.у.м. Наименьшая высотная отметка в исследуемом районе – 126.7 м н.у.м. (урез озера Имандра). При таком перепаде высот поле температуры в приземном воздухе может быть неоднородным даже без антропогенного воздействия. Например, из-за характерного зимой инверсионного распределения температуры в пограничном слое атмосферы вершины холмов окружены более теплым воздухом.

В климатологии хорошо известно, что в условиях холмистого рельефа ночью и зимой в тихую погоду при ясном небе охлажденный воздух, образовавшийся

на выпуклых формах рельефа, как более тяжелый, стекает вниз по склону и скапливается в понижениях рельефа, образуя так называемые «озера холода». Верхняя часть холма при этом становится более теплой, чем его подножие, так как стекающий воздух заменяется более теплым из прилегающих слоев атмосферы. Несмотря на то, что микроклимат создается не только рельефом, считается, что именно такое перераспределение холодного воздуха является одной из основных причин больших градиентов ночных и зимних температур в холмистом рельефе (Гольцберг, 1967; Гейгер, 1960; Микроклимат, 1962; Мищенко, 1984). Так, если при отсутствии стоковых течений разницы температур между подножиями и вершинами холмов остаются небольшими и редко превышают 0.5°C , при наличии склоновых ветров эти различия достигают уже $4 - 5^{\circ}$, а в отдельных случаях и до $8 - 12^{\circ}\text{C}$ (Романова и др., 1983).

Энергетический механизм формирования микроклимата в холмистом рельефе находится в прямой зависимости от глубины расчленения рельефа по вертикали (ΔH) и от степени континентальности климата. Начало стоковых явлений возможно уже при углах наклона порядка нескольких градусов и при относительных превышения $10 - 12\text{ м}$ (Микроклимат, 1962). Для примера в работе (Каушила, 1970) сообщается, что даже в условиях очень выровненного участка протяженностью около 500 м разность минимальных температур при ясной штилевой погоде во все сезоны превышала $5 - 6^{\circ}\text{C}$ при перепаде высот всего 20 м .

Рисунок 6. Фотография г. Апатиты и его окрестностей с отметками высот (фотография Б.Б. Вахмистрова; публикуется с разрешения автора).

Отмечены положение метеорологических станций ПГИ (1) и МГУ (2); ни ГМС "Апатиты", ни АМСГ "Апатиты" в кадр не попадают, их положение указано стрелками

Так как г. Апатиты расположен в верхней части холма, зимой здесь должно быть теплее окрестностей. Небольшие в целом перепады высот компенсируются круглосуточным отрицательным радиационным балансом, благодаря которому при установлении продолжительной антициклонической погоды с ясным небом и слабыми ветрами интенсивное охлаждение подстилающей поверхности и прилегающих слоев воздуха наблюдается в течение многих дней.

Количественные значения средней микроклиматической изменчивости зимних температур в холмистом рельефе в виде отклонений от значений на ровном месте приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение минимальной температуры зимой ($\Delta T_{\text{мин}}$) и температуры самого холодного месяца ($\Delta T_{\text{х}}$) в холмистом рельефе на территории ЕЧР.

Мезорайон по базису эрозии (ΔH)	Параметр	Вершина, верхняя треть склонов	Середина склонов	Широкая долина	Замкнутая долина, котловина	Разность вершина-котловина
Слабовсхолмленный рельеф ЕТР ($\Delta H \leq 50 \text{ м}$)	$\Delta T_{\text{мин}}, \Delta T_{\text{х}}$	+2	+1	-2	-3...-4	+5-+6
Холмистый рельеф ЕТР ($\Delta H \approx 50 \div 150 \text{ м}$)	$\Delta T_{\text{мин}}, \Delta T_{\text{х}}$	+3-+4	>+2	-2...-3	-4...-5	+7-+9

Примечание. Знак «+» означает повышение, знак «-» – понижение зимних температур в холмистом рельефе по сравнению с ровным местом (Мищенко, 1984)

Если исходить из характерного перепада высот $\sim 50 \text{ м}$ и данных таблицы, можно ожидать, что зимой температура воздуха на вершине холма, где расположен г. Апатиты будет примерно на 2°C теплее, чем на ровном месте. Средняя температура в «Академгородке» за декабрь-январь 2014 – 2016 гг. на 1.4°C теплее, чем на АМСГ «Апатиты» и на 2.2°C выше, чем на ГМС «Апатиты», расположенной на берегу озера Имандра. Т.о., средняя разность температур воздуха в центральной части г. Апатиты и на фоновых (вне города) метеорологических станциях не выходит из характерного диапазона ее микроклиматической изменчивости в условиях слабовсхолмленного рельефа.

Разности температур 1.4°C и 2.2°C – это средние значения за период 2014 – 2016 гг. Разность в конкретные моменты времени зависит от метеорологических условий. Например, сильный ветер способствует выравниванию горизонтального распределения, а сплошная облачность уменьшает радиационное охлаждение.

В пользу реальности существования в районе стоковых процессов говорит тот факт, что «остров тепла» в «Академгородке» часто появляется в те же периоды времени, когда увеличиваться и разность температур между АМСГ и ГМС «Апатиты» (рис. 7).

Рисунок 7. Аномалии (от средних значений) разности температур между АМСГ «Апатиты» и ГМС «Апатиты» (1), «Академгородком» и ГМС «Апатиты» (2).

Красным цветом выделена положительная аномалия, синим – отрицательная, черным – отсутствие данных

Рисунок 8. Разность температур между «Академгородком» и АМСГ «Апатиты» (а) и на расположенных вне населенных пунктов АДМС «1166+750» и «1203+350» а/д Р-21 (М-18) "Кола" (б) в декабре-январе 2015-2016 гг.

Действительно, метеорологическая площадка ГМС «Апатиты» расположена вблизи оз. Имандры на высоте 135 м. Это одно из самых низких мест в районе (урез Имандры 126.7 м.). При возникновении склоновых течений температура воздуха на ГМС «Апатиты» снижается за счет накопления холодного воздуха. При этом увеличивается как разность температур между «Академгородком» и ГМС «Апатиты», так и между АМСГ и ГМС «Апатиты» (хотя во втором случае оно меньше по абсолютной величине). Полной синхронности между вариациями указанных разностей нет и, строго говоря, и не должно быть, так как интенсивность стоковых процессов зависит не только от разности высот, но и от комплекса метеорологических условий: облачность, ее форма, высота, влажность воздуха, скорость и направление ветра. Например, течение холодного воздуха

направлено перпендикулярно изогипсам и в зависимости от направления основного (ветрового) потока в различных местоположениях создаются условия, благоприятствующие или препятствующие его возникновению (Романова, 1983).

Полученный в работе результат, безусловно, не может рассматриваться как отрицание возможности существования в г. Апатиты антропогенного городского «острова тепла». Проведенные метеорологические измерения показывают, что в зимний период территория г. Апатиты действительно теплее своих окрестностей. Однако это явление скорее вызвано не антропогенным воздействием на приземный слой воздуха, а естественными причинами. Из-за положения города в верхней части холма метеорологическая станция, установленная в его центральной части на высотах 180 – 190 м н.у.м., зимой в тихую безоблачную погоду из-за стока холодного воздуха окажется теплее своих периферийных районов, находящихся на несколько десятков метров ниже – такое распределение температуры зимой характерно для условий холмистого рельефа в целом. Кроме того, разность температуры воздуха в центральной части г. Апатиты и на фоновых (вне города) метеорологических станциях не выходит из характерного климатического диапазона изменчивости температуры в холмистом рельефе. В качестве иллюстрации на рис. 8 представлена разность температур в холодное время года на двух автоматических дорожных метеорологических станциях (АДМС), установленных на федеральной трассе «Кола» вне населенных пунктов на расстояние примерно 30 км друг от друга. Одна из них (АДМС «1166+750») примерно на 50 – 60 м приподнята над прилегающей равниной, а вторая (АДМС «1203+350») расположена у берега оз. Имандры (140 м н.у.м.), куда также, как и в случае с ГМС «Апатиты» стекает холодный воздух. Как видим, даже в фоновых районах, где нет антропогенных источников тепла, в холодное время года за счет особенностей микроклимата создается значительная разность, достигающая 10 – 15 °С.

Традиционный метод обнаружения городского «острова тепла» основан на сравнении измерений внутри города и в ближайшей сельской местности. Однако существующая метеорологическая сеть достаточно редкая, а выбранные для сравнения ГМС могут оказаться расположенными в разных микроклиматических условиях. Использование маршрутных измерений или инфракрасных изображений подстилающей поверхности не решает проблемы, так как при данных методах исследования также возникает задача выделения воздействия именно городской среды из множества других факторов, способствующих естественной пространственной изменчивости температуры. Ситуация усугубляется тем, что и микроклиматические различия, и городской «остров тепла» проявляются при одних и тех же метеорологических условиях. Многочисленные экспедиционные исследования, выполненные в разных регионах, показывают, что основные климатические показатели из-за микроклиматической неоднородности на близких расстояниях могут изменяться даже сильнее, чем при переходе из одной климатической зоны в другую (Романова и др., 1983). В этой связи

игнорирование особенностей микроклимата, возникающего по естественным причинам, при установлении физических причин появления тех или иных термических аномалий, включая воздействие города на тепловой режим территории, может привести к ошибочной трактовке результатов наблюдений. В небольшом г. Апатиты анализ пространственного распределения температуры и инфракрасных изображений со спутников указывают на существование зимой в городе зоны более высоких температур по сравнению с пригородными районами. Однако обнаруженные температурные различия между городом и пригородами находятся в пределах естественной микроклиматической изменчивости температуры в холмистом рельефе. По этой причине нет оснований сколь-нибудь уверенно говорить об антропогенном характере «острова тепла» в г. Апатиты, по крайней мере, до проведения детальных микроклиматических измерений.

Заключение

Для зимних периодов 2014 – 2015 и 2015 – 2016 гг. проведено сравнение температуры воздуха в г. Апатиты и температуры на ближайших фоновых метеорологических станциях. Обнаружено, что центральная часть города Апатиты теплее своих окрестностей. Однако обнаруженное распределение температуры зимой характерно для условий холмистого рельефа: город расположен в верхней части обширного холма, где имеются условия для стока выхолаженного воздуха. Средняя разница температуры воздуха между центральной частью г. Апатиты и ближайшими фоновыми метеорологическими станциями не выходит из характерного диапазона микроклиматической изменчивости зимней температуры в слабовсхолмленном рельефе. По этой причине невозможно отделить вклад антропогенных факторов в возникновение «острова тепла» в г. Апатиты от вклада естественных процессов.

Список литературы

Гейгер Р. 1960. Климат приземного слоя воздуха. – М., Иностранная литература, 480 с.

Гольцберг И А. 1967. Микроклимат СССР. – Л., Гидрометеиздат, 282 с.

Константинов П.И, Грищенко М.Ю., Варенцов М.И. 2015. Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область). – Исследование Земли из космоса, № 3, с. 27 – 33.

Каушила К.А. 1970. К вопросу о территориальном распределении и годовом ходе различий минимальной температуры воздуха, обусловленных рельефом. – Труды ГГО, вып. 264, Микроклиматология, с. 90 – 96.

Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры / Под ред. И.А. Гольцберг. 1962. – Л., Гидрометеиздат, 250 с.

Мищенко З.А. 1984. Биоклимат дня и ночи. – Л., Гидрометеиздат, 280 с.

Оке Т.Р. 1982. Климаты пограничного слоя. – Л., Гидрометеиздат, 360 с.

Романова Е.Н., Мосолова Г.И., Берсенева И.А. 1983. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. – Л., Гидрометеиздат, 246 с.

Konstantinov P. I., Grishchenko M. Y., Varentsov M. I. 2015. Mapping urban heat islands of arctic cities using combined data on field measurements and satellite images based on the example of the city of Apatity (Murmansk oblast). Izvestiya RAS – Atmospheric and Oceanic Physics. vol. 51, No. 9, p. 992 – 998.

Статья поступила в редакцию: 12.04.2016.

После переработки: 22.09.2016.