

ПЕРВИЧНЫЙ АНАЛИЗ ВКЛАДА АНТРОПОГЕННОГО ФАКТОРА В ФОРМИРОВАНИЕ «ОСТРОВА ТЕПЛА» ГОРОДА АПАТИТЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



Михаил Варенцов

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА,
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ
ИМЕНИ А.М. ОБУХОВА РАН



Павел Константинов

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

Природа микроклиматических особенностей города Апатиты, расположенного в Заполярье (в Мурманской области), в последние годы стала предметом научной дискуссии. Экспериментальные измерения, проведенные авторами в январе — феврале 2014 и 2015 гг., установили, что в условиях ясной и холодной погоды в центре города наблюдаются существенно более высокие температуры, чем на метеостанции «Апатитовая», расположенной в нескольких километрах от города (Константинов и др., 2015). Максимальные значения разности температур достигали более 10°C, что сопоставимо с типичными максимальными значениями интенсивности городского «острова тепла» крупных мегаполисов. Значимость такого «открытия» обусловлена тем, что климатология «островов тепла» городов, расположенных в высоких широтах, до не-

давнего времени оставалась практически неизученной. Притом сама возможность их возникновения в условиях крайне низкой инсоляции или даже ее полного отсутствия вызвала вопросы, т.к. одним из основных факторов, обуславливающих формирование эффекта «острова тепла» считается более эффективное поглощение городом солнечной радиации. Однако наблюдаемые в Апатитах микроклиматические особенности можно также объяснить особенностями рельефа — положением города на холме, а метеостанции «Апатитовая» — у его подножья, где в условиях устойчивой стратификации атмосферы может скапливаться холодный воздух (Демин и др., 2016).

Для детального описания генезиса термической аномалии города Апатиты были использованы два независимых подхода:

1. Анализ данных новых, более продолжительных экспериментальных измерений (схема приведена на рис. 1) с помощью автоматизированных метеорологических датчиков и метеостанций

При анализе прямых метеорологических измерений в первую очередь было установлено, что интенсивность наблюдаемой термической аномалии (рис. 2) зависит от условий погоды (ветра и балла облачности), характеризуемых следующим численным показателем (фактор погоды):

$$W_f = (1 - k_1 \cdot n_1^2 - k_2 \cdot (n_1 - n_2)^2) \cdot (\min(u^{1/2}; 1),$$

где u — скорость ветра, n_1 и n_2 — баллы нижней и общей облачности соответственно, k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от балла облачности, приняты равными в среднем 0,8 и 0,4 соответственно (Оке, 1998).

С учетом того, что, во-первых, данные наблюдений в ботаническом саду (R2) имели много пропусков, и, во-вторых, один из термодатчиков (R3) упал в снег 8 февраля 2016 г., далее рассматриваются различные

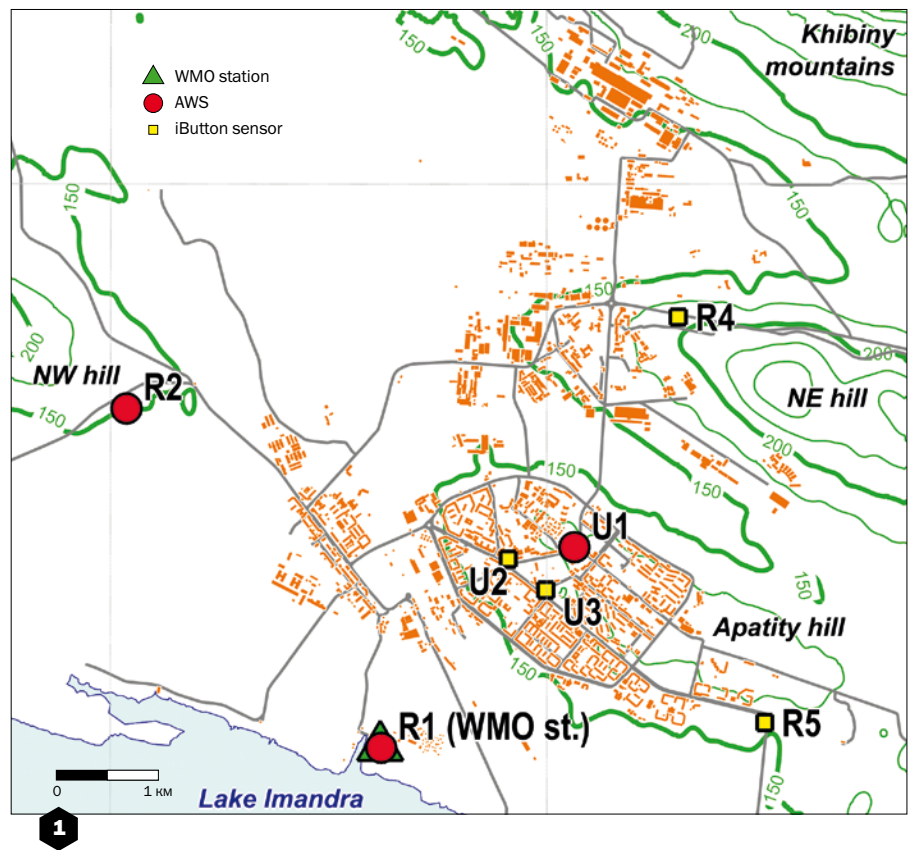


Рис. 1. Расположение пунктов измерений, установленных авторами в 2015–2016 гг. в пределах города Апатиты с помощью автоматических метеорологических станций (AWS: U1 (центр города); R1 («фоновая» станция рядом с сетевой метеостанцией ВМО); R2 («фоновая» станция в Ботаническом саду) и компактных термодатчиков системы iButton (U2 и U3 в городской черте; R4 и R5 — в «фоновых» зонах)

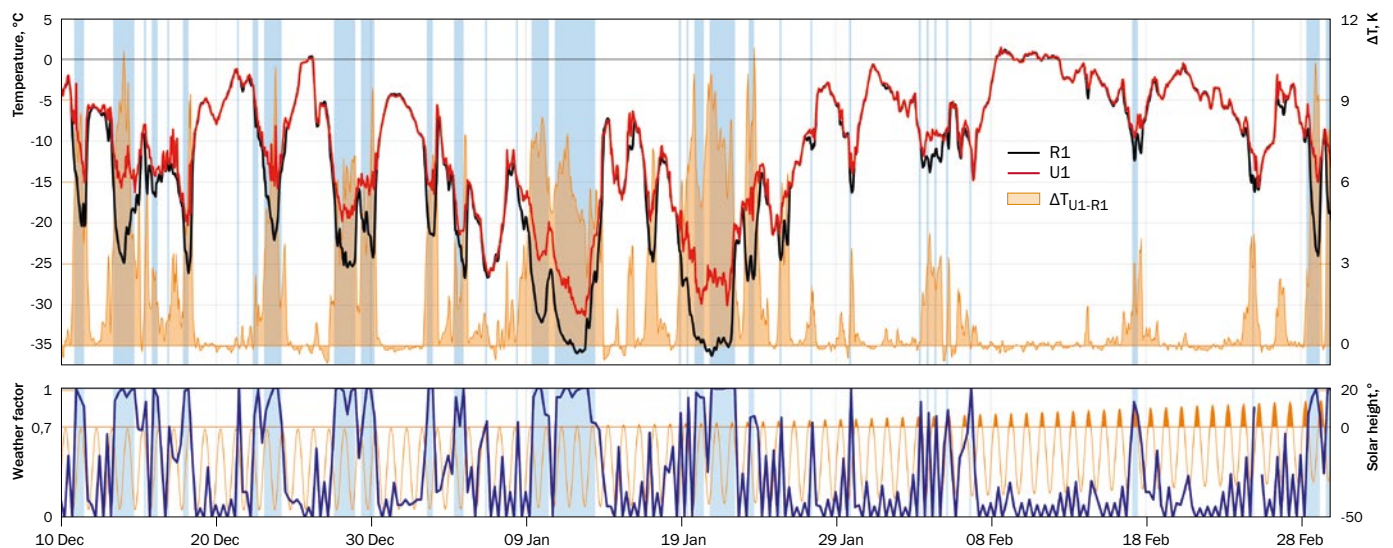


Рис. 2. Связь температуры воздуха и термической аномалии (ΔT) в районе г. Апатиты между городской станцией (U1) и фоновой (R1) с погодными условиями (weather factor). Голубыми областями отмечены периоды с $W_f > 0,7$. Также на нижнем графике оранжевым цветом показана высота солнца над горизонтом

Табл. 1. Средние значения температуры воздуха в точках ее измерения в зимний период 2015–2016 гг.

Точка измерений	Высота над у. м., м	Период осреднения			
		10 декабря–1 марта	10 декабря–1 марта*	10 декабря–8 февраля	10 декабря–8 февраля*
В пределах города					
U1 (AWS)	185	–10,3	–8,1	–12,5	–11,1
U2 (iButton)	169	–10,3	–8,0	–12,7	–11,1
U3 (iButton)	170	–10,3	–7,9	–12,6	–11,1
За пределами города					
R1 (AWS)	130	–12,2	–10,0	–14,8	–13,1
R2 (AWS)	153	–	–9,0	–	–12,6
R3	168	–	–	–14,3	–12,0
R4	200	–10,8	–8,6	–13,1	–10,7

* только для сроков, за которые доступны данные измерений в ботаническом саду

периоды осреднения: с 10 декабря по 1 марта, с 10 декабря по 8 февраля, а также в эти же периоды, но только для сроков, когда работала АМС в ботаническом саду (R2). Средние за эти периоды значения температуры в точках измерений приведены в таблице 1.

Следует отметить, что для всех рассматриваемых периодов средняя температура для трех городских точек примерно одинакова. Разность между температурными показателями в городе (U1) и на метеостанции «Апатиты» (R1) составляет примерно 2°C. Разность между температурными показателями в городе и в остальных «фоновых» местах измерений (т.е. в расположенных за пределами застройки точках) меньше, чем между зафиксированными в городе и на метеостанции «Апатиты» (R1). Температура по данным измерений R2 и R3, расположенных на схожих с городскими датчиками высотах, имеет значения, в среднем на 1–1,5°C ниже, чем в городе. При этом важно отметить, что термоматчик R3 расположен на том же холме, что и город. Разность температуры между «городом» и термоматчиком R4 (расположенном на соседнем холме на большей высо-

те) меньше и составляет в среднем 0,4–0,6°C (в зависимости от периода осреднения). Если более подробно рассмотреть временную динамику температуры во всех этих точках, можно сделать вывод, что периоды выраженных микроклиматических различий сменяются периодами, когда температура практически совпадает во всех точках измерений (рис. 2). При этом имеют место периоды, когда разницы температур, измеренных в городе и во всех «фоновых» точках практически не наблюдается, а также периоды, во время которых выраженные термические различия можно наблюдать только при измерениях, проведенных в городе (U1), на метеостанции «Апатиты» (R1) и в точке установки iButton R3, а различий температуры в городе, в ботаническом саду (R2) и в точке установки термоматчика R4 не возникает, что, по всей вероятности, связано со сложными процессами стекания холодного воздуха и особенностями турбулентного перемешивания в условиях холмистого рельефа. Тем не менее можно выделить периоды, когда температура в городе была существенно выше (минимум на 3–4°C), чем во всех «фоновых» точках, включая точку

установки термоматчика R4, расположенную выше центральной части.

2. Анализ данных о температуре подстилающей поверхности, полученной из космических снимков в инфракрасном диапазоне

Для более детального изучения распределения температуры в окрестностях города Апатиты были использованы данные дистанционного зондирования прибора MODIS (Moderate-resolution imaging spectroradiometer): температура поверхности по данным измерений со спутников Aqua и Terra (продукты MOD11a1 и MYD11a1). Горизонтальное разрешение данных составляло 1 км, временное — 2 срока в день (днем и ночью).

Волновой диапазон, в котором работают данные приборы, не позволяет проводить измерения в случае наличия облачности, для закрытых ею ячеек данные отсутствуют. Чтобы корректно учитывать ячейки, закрытые облачностью, при осреднении, был разработан алгоритм, позволяющий восстанавливать температуру для единичных ячеек. Они восстанавливались по данным соседних ячеек методом линейной интер-

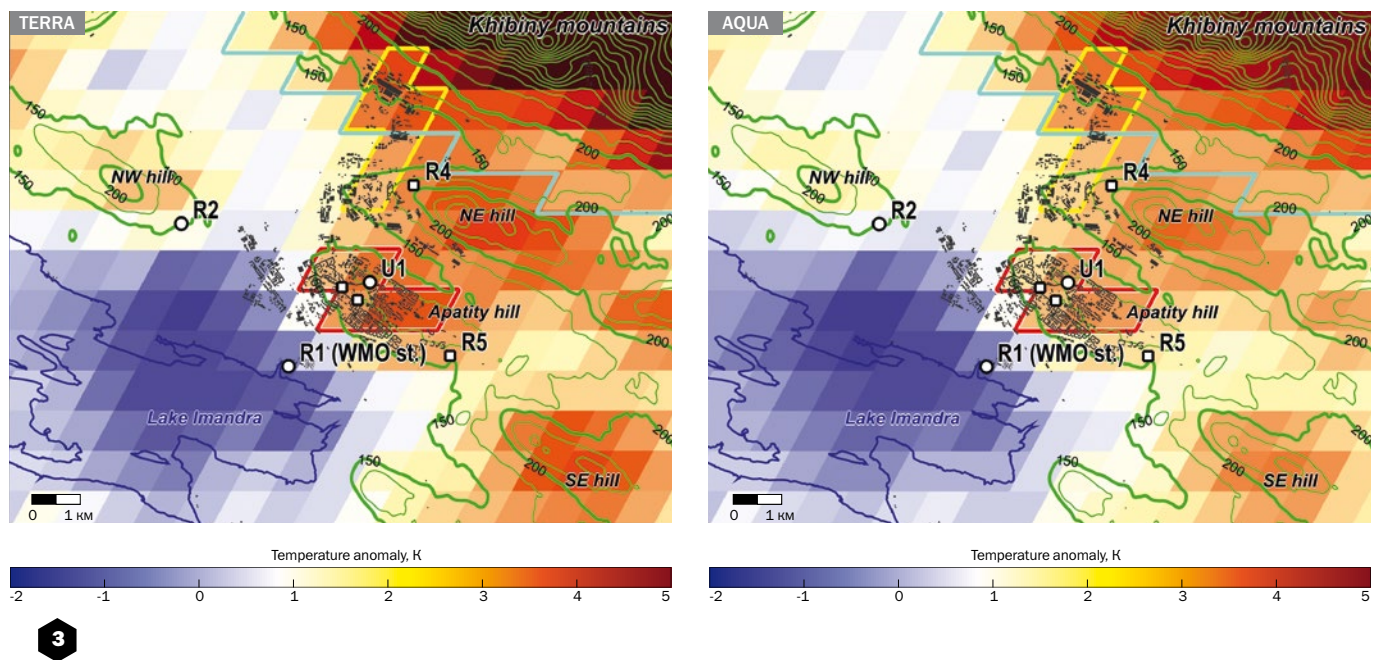


Рис. 3. Средняя температура поверхности в зимний период 2011–2016 гг. в регионе г. Апатиты по данным MODIS TERRA и MODIS AQUA

поляции. Снимки, для которых для исследуемого района (40x40 км вокруг г. Апатиты) данные отсутствовали для более чем 20% пикселей, не использовались для осреднения.

Осреднение проводилось для всех снимков, сделанных в течение зимних месяцев (декабрь, январь, февраль) за период с 2011 по 2015 гг.

Если более внимательно рассмотреть распределение температуры на холме (рис. 3), на котором находится город, то можно отметить следующую закономерность: если на юг и на запад от города температура убывает вместе с высотой местности, то на восток от города высота поверхности не меняется, однако температура уменьшается (хотя не настолько разительно, как на юг и на запад от города). Температура, измеренная в городе и на тех же высотах к востоку от него, составляет примерно половину разницы температур, зафиксированных в городе и на метеостанции «Апатитовая». Установлено, что

данные контактных измерений согласуются с данными дистанционного зондирования. При этом оба типа данных подтверждают, что холмистый рельеф зимой, в условиях преобладания устойчивой стратификации атмосферы, обуславливает формирование хорошо выраженных микроклиматических различий, превращая каждый холм в обособленный «остров тепла». Однако холм, на котором расположен город, оказывается значительно теплее других территорий, расположенных на тех же высотах (см. холмы “NW Hill” и “NE Hill” на рис. 3).

Также стоит отметить, что спутниковая климатология термических аномалий соответствует данным наблюдений и при этом демонстрирует яркую зависимость температуры от высоты и рельефа. Разность между температурой, зафиксированной в городе и на «фоновых» территориях, расположенных в схожих ландшафтных и ортографических условиях, составляет 1–1,5°C в среднем за зиму,

с характерными максимумами до 5°C. Это составляет примерно 50% как от средних за зиму, так и от максимальных значений разности температуры между центром города U1 и метеостанцией «Апатитовая» R1 (примерно 2 и 10°C соответственно).

Таким образом, с учетом перечисленных выше закономерностей, следует заключить, что проведенный первичный совмещенный анализ спутниковых данных и данных прямых метеорологических измерений позволяет выдвинуть гипотезу о том, что наблюдаемые термические различия между городом и метеостанцией «Апатитовая» примерно в равных долях обусловлены влиянием рельефа и антропогенного «острова тепла», средняя интенсивность которого составляет 1–1,5°C, а максимальная — примерно 5°C. Такая оценка хорошо согласуется с результатами, рассчитанными для города Норильска (Варенцов и др., 2014), а также с предварительными результатами данных экспе-

риментальных измерений в городах, расположенных в условиях равнинного рельефа на севере Западной Сибири (в Надыме, Салехарде и Новом Уренгое), проведенных зимой 2016–2017 гг. (Varentsov et al., 2). В случае получения дополнительных подтверждений гипотеза может в первом приближении использоваться в качестве оценки зимних значений интенсивности «островов тепла» городов Арктической зоны РФ с населением 50–100 тыс. человек. ¶

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-55-71004): The Belmont Forum project HIARC – Anthropogenic Heat Islands in the Arctic: Windows to the Future of the Regional Climates, Ecosystems and Societies, гранта № 18-05-00715 а также проекта TRAKT-2018 (Transferable Knowledge and Technologies for High-Resolution Environmental Impact Assessment and Management)

Список литературы:

1. Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.
2. Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 6.
3. Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В., Константинов П.И. Роль рельефа в возникновении «острова тепла» в городе Апатиты // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 2. С. 95–106.
4. Константинов П.И., Грищенко М.Ю., Варенцов М.И. Картографирование островов тепла городов Заполярья по Совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская Область) // Исследования Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27–33.
5. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM—the climate version of LM: brief description and long-term applications // COSMO Newsl. 2006, 6. Pp. 225–235.
6. Oke T.R. An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude // Preprints, Second Symposium on Urban Environment, November 2–5, Albuquerque, NM, 1998. С. 80–83.
7. Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Miles V. Anthropogenic and natural factors of intensive urban heat island in the Arctic // Rep. Ser. aerosol Sci. Proc. 3rd Pan-Eurasian Exp. Conf. 7th PEEEX Meet. 2017. V. 201. P. 514–516.

