

Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска

М.И. Варенцов^{1,2}, П.И. Константинов¹, Т.Е. Самсонов³, И.А. Репина²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, Москва, 119991, Россия*

²*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Лаборатория взаимодействия океана и атмосферы, Москва, 119017, Россия*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, Москва, 119991, Россия*

E-mail: mvar91@gmail.com

Работа посвящена изучению эффекта городского острова тепла Норильска, одного из крупнейших городов Заполярья, в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных наземных измерений автоматических метеостанций и компактных термодатчиков iButton, а также с использованием данных дистанционного зондирования съёмочной системы MODIS. По итогам исследования впервые было показано, что несмотря на отсутствие притока солнечного тепла, более эффективное поглощение и накопление которого городской застройкой считается одной из основных причин формирования городского острова тепла, в Норильске в условиях полярной ночи за счет антропогенного потока тепла формируется достаточно мощный остров тепла, интенсивность которого может достигать 6-7°C. В данной работе рассматривается методика исследования, особенности распределения температуры воздуха в Норильске и окрестностях по данным наземных и дистанционных измерений, свидетельствующие о наличии городского острова тепла, также дается оценка экономической значимости данного явления с точки зрения отопления северных городов.

Ключевые слова: городской остров тепла, климат города, дистанционное зондирование, экспериментальные измерения, отопление, энергосбережение, Заполярье, Норильск, iButton, MODIS

Введение

Перспективы роста существующих городов и строительства новых поселений, связанные с интенсификацией социально-экономической деятельности в Арктике, обуславливают актуальность изучения микроклимата арктических городов. Наиболее важной особенностью городского климата, как с научной, так и с прикладной точки зрения - эффект городского острова тепла: летом, в периоды экстремальной жары, он приводит к усилению теплового стресса и связанной с ним смертности (Buechley et al., 2002) а также к увеличению энергозатрат на кондиционирование воздуха (Sailor, 2002). Для зимнего периода можно, напротив, предположить, что эффект городского острова тепла может смягчать морозы и уменьшать количество топлива, необходимого для отопления, что особенно актуально в условиях суровых зим российского севера. Однако, в отличие от тропических и умеренных широт, для которых феномен острова тепла изучен достаточно хорошо (Oke, 1987 и др.), для городов Заполярья таких исследований практически не проводилось, равно как не изучались аспекты влияния острова тепла на городское население и хозяйство в суровых северных условиях. В единственном известном авторам статьи подобном исследовании изучались микроклиматические особенности

небольшого города Фэрбенкс на Аляске (Magee et al., 1999), в то время как острова тепла крупнейших городов Заполярья, которые расположены в России, до недавнего времени оставались неизученными. Было даже не совсем понятно, возможно ли вообще формирование этого феномена в условиях Заполярья зимой, так одной из основных причин его возникновения считается более эффективное поглощение и сохранение городом солнечного тепла (Оке, 1987; Руу, Ваик, 2012), которое в течение полярной ночи отсутствует.

Одной из причин неизученности островов тепла российских северных городов является отсутствие необходимых данных постоянных стационарных наблюдений: во всех этих городах они представлены всего лишь одной станцией, в то время как для изучения острова тепла необходимо как минимум две, одна в центре города и одна за его пределами. С целью получения натуральных данных и изучения этого феномена для городов Заполярья, зимой 2013-2014 гг. научной группой из МГУ им. М.В. Ломоносова и ИФА РАН им. А.М. Обухова, при поддержке Русского географического общества была организована серия экспедиций в крупнейшие города Заполярья, в том числе в декабре 2013 года были проведены экспериментальные измерения в Норильске.

Результаты экспериментальных измерений

В ходе экспедиции в Норильске с 21 по 23 декабря 2013 г., т.е. в середине полярной ночи, были проведены детальные измерения температуры воздуха с помощью двух автоматических метеостанций Davis Vantage Pro 2 и сети из 18-ти компактных термодатчиков iButton, также проводились измерения профиля температуры над городом с помощью метеорологического профилемера МТР-5. Также были получены данные наблюдений расположенной в полутора километрах на востоке от города метеорологической обсерватории Таймырского ЦГМС (доступные на сайте www.rp5.ru) и данные измерений температуры, проводимые на норильской ТЭЦ-1, расположенной в южной части города.

Анализ данных измерений выявил существенную неоднородность поля температуры в Норильске и окрестностях. Это демонстрирует график динамики температуры в различных точках измерений на *рис. 1*, а также поля температуры воздуха на *рис. 2*, построенные с помощью геостатистической интерполяции (кригинга) данных наблюдений с учетом влияния рельефа, которое учитывалось на основе измерений профилемера МТР-5 и цифровой модели рельефа ASTER. Хорошо видно, что в городе температура воздуха выше, чем в районе метеорологической обсерватории Норильского ЦГМС, расположенной на удалении от застройки. При этом теплее всего не в центре города, а на его западной окраине, на берегу озера Долгое, которое не замерзает зимой по причине его использования для охлаждения промышленных

предприятий и является мощным источником тепла. Среднее значение разницы температур между городом и обсерваторией за три дня наблюдений составило 2⁰С для центра города и 3⁰С для точки у озера, а ее максимальные значения достигали 6-7⁰С. Привлечение к анализу данных о рельефе и стратификации атмосферы (согласно измерениям профилемера) показало, что эти различия практически не связаны напрямую с влиянием рельефа и стратификации (вклад этих факторов не превышает 0,1-0,2⁰С), остается предположить, что они обусловлены эффектом городского острова тепла и потоком тепла от незамерзающим озером.

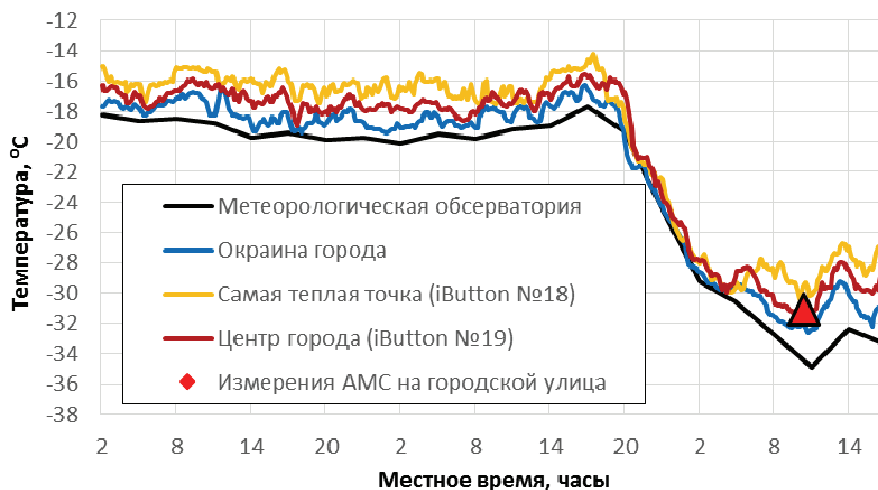


Рис. 1. Динамика температуры воздуха для точек измерений в Норильске и окрестностях за период в течение 21-23 декабря 2013 г.

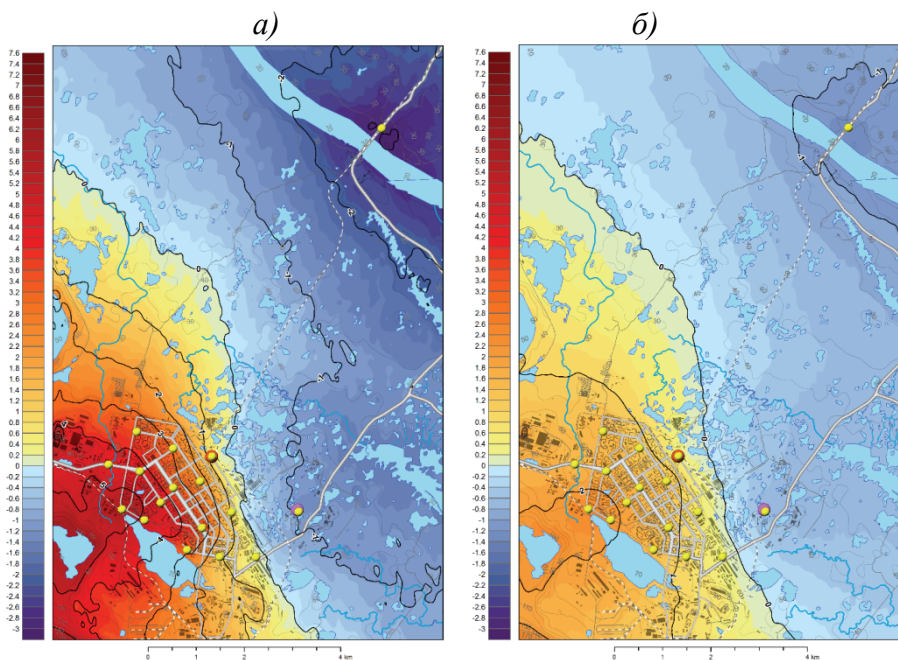


Рис. 2. Поля аномалий температуры воздуха (отклонений от среднего по пространству значения) для момента с максимальными температурными контрастами (а) и для средних за 21-23 декабря значений (б). Желтыми значками показаны точки измерений с помощью термодатчиков iButton, красным – с помощью АМС, фиолетовым – обсерватория Норильского ЦГМС

Анализ данных дистанционного зондирования

Для того чтобы окончательно подтвердить выдвинутую гипотезу о существовании в Норильске в условиях полярной ночи мощного городского острова тепла, необходимо убедиться, что эта аномалия постоянна во времени и ослабевает на удалении от города, что невозможно сделать на основе экспериментальных измерений по причине их недостаточного пространственного и временного охвата. Для решения этой проблемы использованы данные спутникового зондирования о температуре земной поверхности, полученные из космических снимков в инфракрасном диапазоне системы MODIS, включающей в себя спутники TERRA и AQUA, в каналах 31 и 32 (10,78–11,28 мкм и 11,77–12,27 мкм, соответственно). В исследовании использовались продукты, содержащие данные о температуре земной поверхности, рассчитанные по значениям интенсивности теплового излучения и параметрам атмосферы – MOD10A1 и MYD10A1 для спутников TERRA и AQUA, соответственно, имеющие пространственное разрешение 1000 м.

К сожалению, из-за наличия в рядах спутниковых данных частых пропусков, рассмотреть спутниковые снимки для периода экспериментальных оказалось невозможно – за этот период они полностью отсутствовали. По этой причине для анализа был взят более продолжительный период: ноябрь 2013 – январь 2014 гг., для которого было отобрано 67 случаев с достаточным качеством покрытия для окрестностей Норильска по данным спутника TERRA и 64 случая по данным супника AQUA. Анализ этих данных позволил однозначно идентифицировать тепловую аномалию в окрестностях Норильска, хорошо проявляющуюся как в отдельные моменты (*рис. 3*), так в среднем поле температуры по данным дистанционного зондирования (*рис. 4*), хорошо согласующуюся с данными экспериментальных измерений. Наложение на эти поля изогипс, построенных по данным цифровой модели рельефа ASTER, позволило установить, что обширная теплая аномалия к югу от города связана с влиянием рельефа, но ее протянувшийся в сторону Норильска отрог «отрывается» от изолиний и выходит на равнину. Таким образом, можно утверждать, что Норильск формирует мощный остров тепла, который, однако, сливается с положительной аномалией, связанной с рельефом местности. Примечательно, что в поле средней температуры поверхности по данным MODIS также выделяется положительная аномалия к западу от Норильска, в районе Кайеркана – там расположен крупный металлургический комбинат, который, видимо, также создает локальный остров тепла.

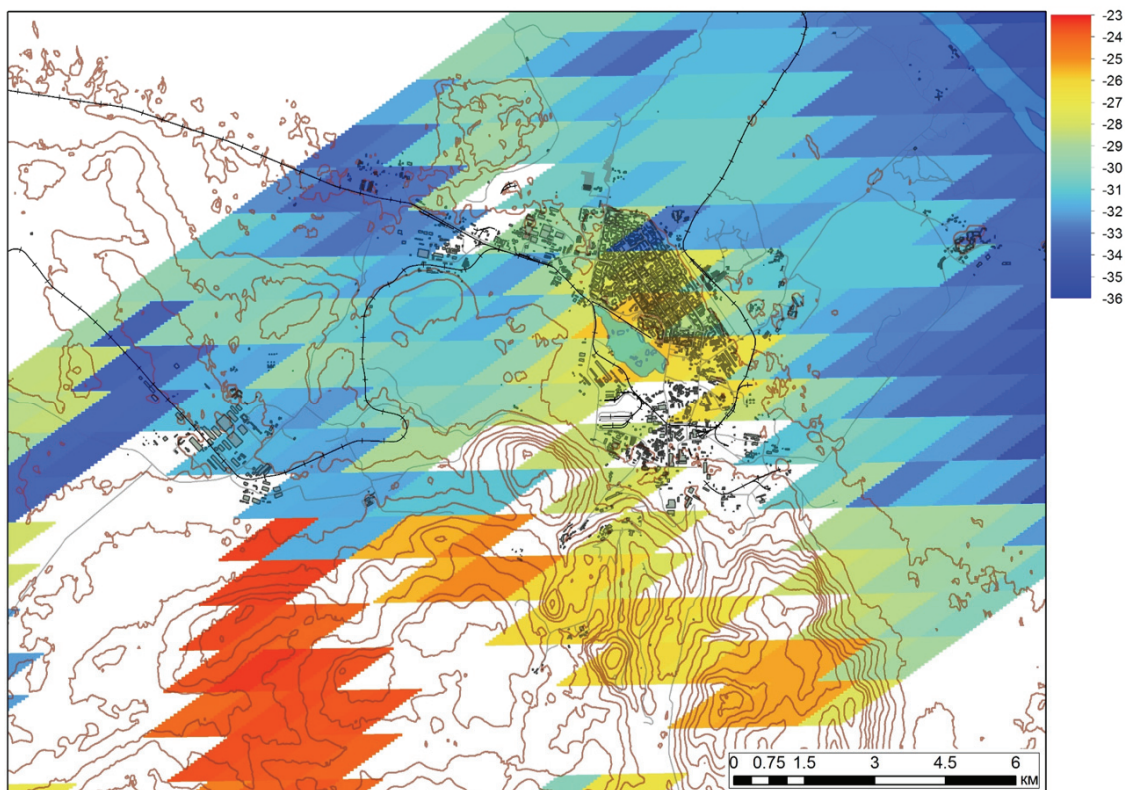


Рис. 3. Температура поверхности в окрестностях Норильска по данным зондирования со спутника TERRA 17 января 2014 года. Изогипсы по данным ЦМР ASTER показаны коричневыми линиями и проведены через 50 м

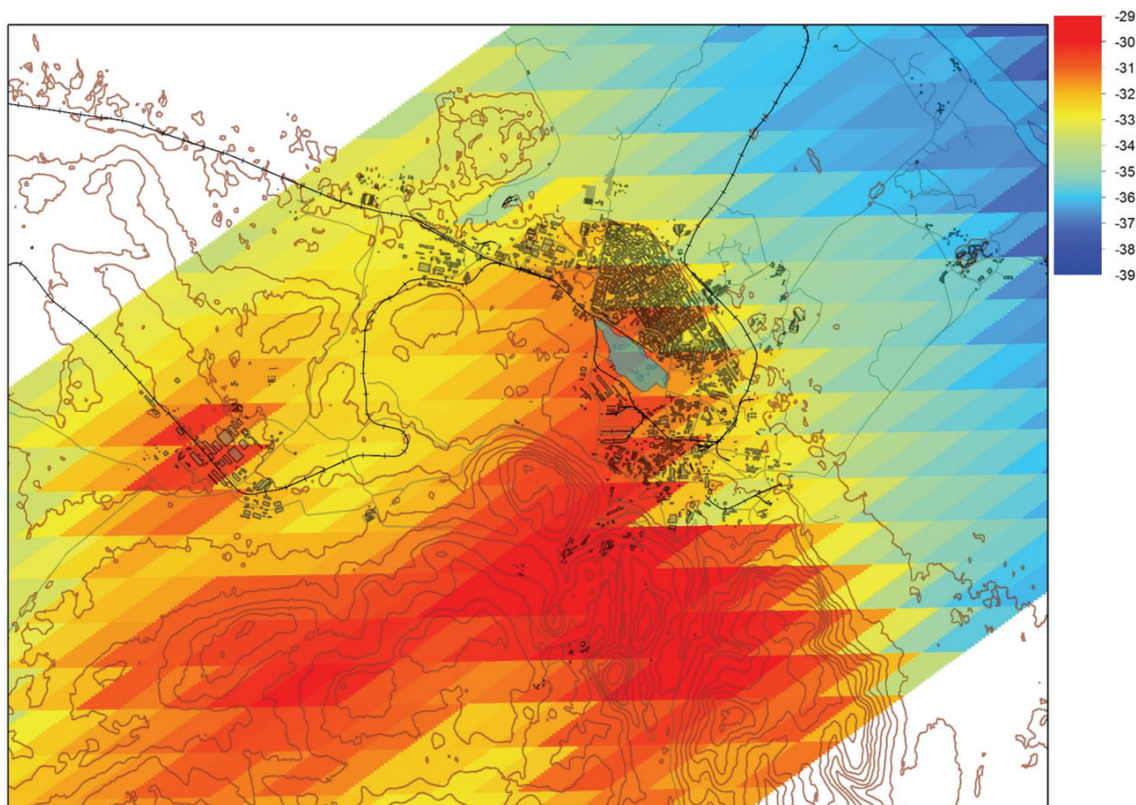


Рис. 4. Средняя температура поверхности в окрестностях Норильска по данным 67 зондирований со спутника TERRA за период ноябрь 2013 г. – январь 2014 г. Изогипсы по данным ЦМР ASTER показаны коричневыми линиями и проведены через 50 м

После успешного применения спутниковых данных для идентификации эффекта городского острова тепла Норильска, встал вопрос об оценке возможности применения этих данных для более детального изучения этого феномена, в первую очередь, исследования его климатологии. Однако это требовало, в первую очередь, верификации спутниковых данных путем сравнения с наземными наблюдениями, что, как уже было сказано, оказалось невозможно сделать с использованием сделанных в ходе экспедиции измерений. Ввиду отсутствия более надежных измерений, для этой цели интенсивность острова тепла, оцененная по спутниковым данным (как разница средних значений «пикселей», охватывающих территорию города и окрестности метеорологической обсерватории), была сравнена с разницей температуры по данным метеорологической обсерватории и норильской ТЭЦ-1. Несмотря на то, что измерения, проводимые для нужд ТЭЦ, сложно назвать эталонными, их сравнение с экспериментальными измерениями показало, что они относительно неплохо характеризуют интенсивность острова тепла, хотя и несколько ее занижают (рис. 5).

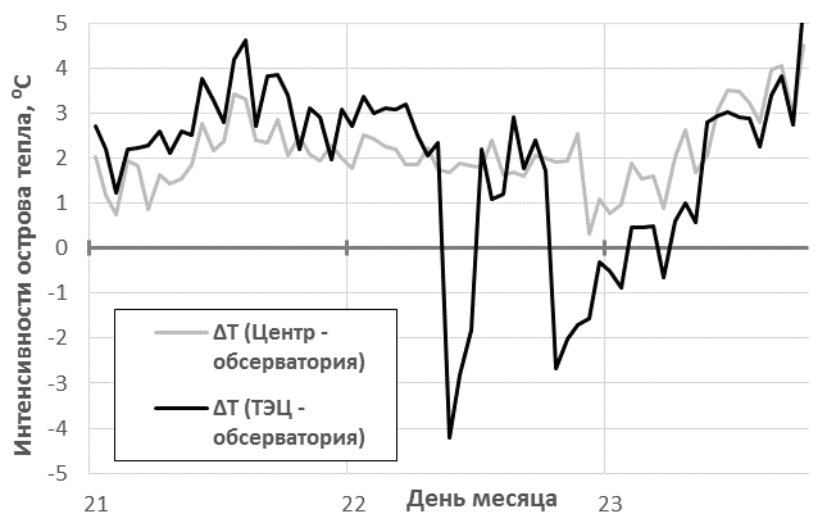


Рис. 5. Сравнение интенсивности острова, рассчитанной как разница измерений термодатчика *iButton* в центре города и метеорологической обсерватории, и как разница измерений температуры для нужд ТЭЦ и метеорологической обсерватории за период 21-23 декабря 2013 г.

Результаты проведенного сравнения (рис. 6) показали наличие слабой взаимосвязи между значениями интенсивности острова тепла по данным наземных и спутниковых наблюдений для спутника TERRA (критерий значимости тренда 0,3, коэф. корреляции 0,55) и практически полное отсутствие какой-либо связи для спутника AQUA (0,13 и 0,36, соответственно). Такую слабую взаимосвязь можно объяснить, во-первых, возможными проблемами с качеством данных наблюдений, проводимых для нужд ТЭЦ, и, во-вторых, закономерным различием температуры воздуха и температуры поверхности. Несмотря на тесную связь, эти величины могут существенно различаться, равно как и связанные с ни-

ми интенсивности поверхностного и выраженного в поле температуры воздуха островов тепла (Mills, 2004). Таким образом, на основе данного сравнения можно сделать вывод, что даже для условий полярной ночи, когда температурные контрасты, связанные с неравномерностью освещения, исчезают, в задачах изучения городского острова тепла данные дистанционного зондирования могут успешно дополнять данные наземных измерений, но не могут их полностью заменить.

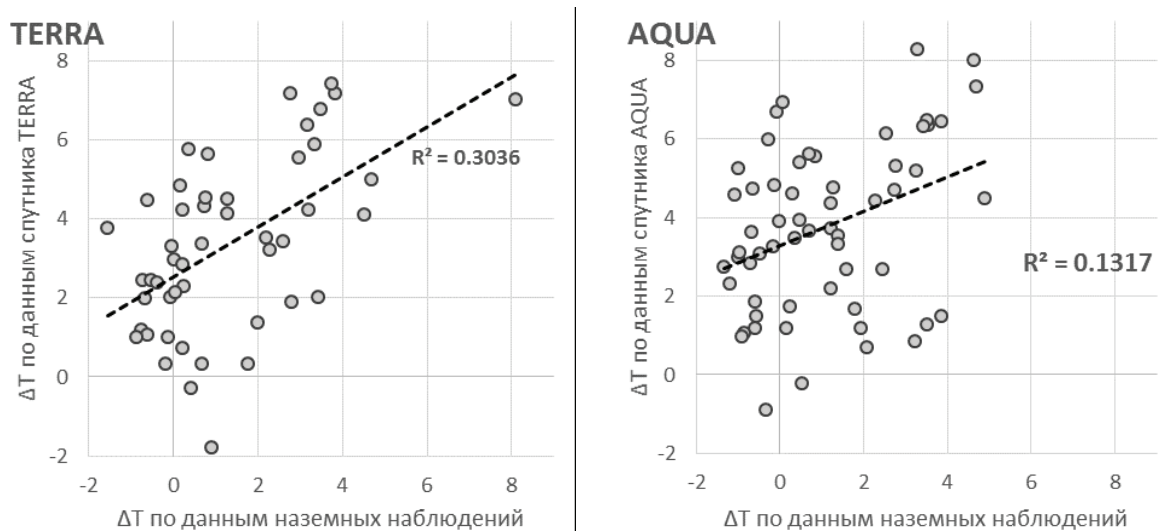


Рис. 6. Диаграммы рассеяния для значений интенсивности острова тепла, рассчитанных по данным дистанционного зондирования и наземных метеорологических наблюдений

Оценка экономической значимости эффекта городского острова тепла для городов Заполярья

Для того чтобы оценить значимость полученных результатов для отопления города, была разработана статистическая модель теплоэлектроцентрали (далее ТЭЦ), рассчитывающая, сколько топлива необходимо сжигать при заданной температуре наружного воздуха. С помощью нее была рассчитано, что изменение температуры воздуха на 1⁰С для Норильской ТЭЦ-1 эквивалентно сжиганию 80 тыс. м³ природного газа. Если допустить, что среднее значение интенсивности острова тепла в 2⁰С сохраняется в течение отопительного периода (продолжительностью около 300 дней), при стоимости газа 4,14 руб/м³ (по данным ОАО «НТЭК» за 2012 г.) это эквивалентно более чем 180 млн. рублей за год. Безусловно, эта очень грубая оценка, но она позволяет оценить, насколько выросла бы стоимость отопления города в гипотетической ситуации, если бы феномен городского острова тепла отсутствовал. С практической точки зрения важнее другая оценка: сравнение температуры, измеряемой для нужд Норильской ТЭЦ, с экспериментальными измерениями в городе показало, что измерения на ТЭЦ занижают температуру воздуха относительно средней по городу в среднем на 0,4⁰С. Эта на первый взгляд незначительная ве-

личина, однако она эквивалентна примерно 35 млн. рублей за отопительный период, и это средства, которые можно реально сэкономить, если оптимизировать систему мониторинга температуры в городе.

Заключение

В качестве заключения можно выделить основные результаты исследования:

- в условиях полярной ночи в Норильске за счет антропогенного потока тепла формируется хорошо выраженный городской остров тепла, интенсивность которого может достигать как минимум 6-7°C;
- городской остров тепла Норильска диагностируется по данным спутникового зондирования съемочной системы MODIS, однако сравнение спутниковых данных с наземными метеорологическими наблюдениями демонстрирует значительные расхождения в оценках его интенсивности для конкретных случаев, что затрудняет использование этих данных для решения исследовательских и прикладных задач;
- полученные оценки экономического значения городского острова тепла свидетельствуют, что тщательный учет этого феномена важен для эффективного решения задачи отопления городов Заполярья, и создают мотивацию для дальнейшего изучения данной проблемы.

Исследование выполнено при поддержке грантов Русского географического общества 69/2013-Н7 и 27/2013-Н3.

Литература

1. *Buechley R.W., Van Bruggen J., Truppi L.E.* Heat island equals death island? // *Environmental Resources*. 1972. Vol. 5. P. 85-92.
2. *Oke, T.R.* *Boundary Layer Climates*. 2nd edition. London: Routledge. 1987. 435 pp.
3. *Magee N., Curtis J., Wendler G.* The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // *Theor. Appl. Climatol.* 1999. Vol. 64. P. 39-47.
4. *Sailor, D. J.* *Urban Heat Islands, Opportunities and Challenges for Mitigation and Adaptation*. Sample Electric Load Data for New Orleans, LA (NOPSI, 1995). North American Urban Heat Island Summit. Toronto, Canada. 1-4 May 2002. Data courtesy Entergy Corporation. 2002.
5. *Young-Hee R., Jong-Jin B.* Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Intensity // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2012. Vol. 51. P. 842-854.
6. *Mills G.* The Urban Canopy Layer Heat Island // *IAUC Teaching reaching resources*. 2004. P. 1-5.

Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city

M.I. Varentsov^{1,2}, P.I. Konstantinov¹, T.E. Samsonov¹, I.A. Repina²

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics, Moscow 119017, Russia*

E-mail: mvar91@gmail.com

This article is devoted to investigation of the urban heat island phenomenon of Norilsk city, which is one of the biggest polar cities, under the polar night conditions using automatic weather stations, iButton compact temperature sensors and MODIS remote sensing data. It was found that during polar night the anthropogenic heat flux forms a significant urban heat island in Norilsk with the intensity of up to 6-7°C in spite of complete absence of solar light, whose absorption and accumulation by urban surface is considered an important factor of urban heat island formation. We consider the methods of research, features of temperature distribution in the region of Norilsk according to experimental measurements and remote sensing data, revealing the presence of the urban heat island. Also, the economic effect of this phenomenon is assessed.

Keywords: urban heat island, urban climate, remote sensing, experimental measurements, house heating, energy saving, Arctic, Norilsk, iButton, MODIS.

References

1. Buechley R.W., Van Bruggen J., Truppi L.E., Heat island equals death island?, *Environmental Resources*, 1972, Vol. 5, pp. 85-92.
2. Oke, T.R., *Boundary Layer Climates*, 2nd edition, London: Routledge, 1987, 435 pp.
3. Magee N., Curtis J., Wendler G., The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska, *Theor. Appl. Climatol*, 1999, Vol. 64, pp. 39-47.
4. Sailor, D. J., Urban Heat Islands, Opportunities and Challenges for Mitigation and Adaptation. Sample Electric Load Data for New Orleans, LA (NOPSI, 1995), *North American Urban Heat Island Summit*. Toronto, Canada. 1-4 May 2002. Data courtesy Entergy Corporation, 2002.
5. Young-Hee R., Jong-Jin B., Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Intensity, *J. Appl. Meteor. Climatol*, 2012, Vol. 51, pp. 842-854.
6. Mills G., The Urban Canopy Layer Heat Island, *IAUC Teaching reaching resources*, 2004, pp. 1-5.