
СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМ В СУБАРКТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОСТРОВОВ ТЕПЛА ГОРОДОВ ЗАПОЛЯРЬЯ ПО СОВМЕЩЕННЫМ ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ г. АПАТИТЫ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2015 г. П. И. Константинов*, М. Ю. Грищенко, М. И. Варенцов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Географический факультет, Москва

**E-mail: kostadini@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2014 г.

В статье приводятся результаты исследования городского острова тепла (Urban Heat Island, UHI) г. Апатиты в зимний период, полученные по данным полевых метеорологических измерений и космических снимков. По температуре поверхности, полученной из космических снимков, проведены расчеты температуры приземного слоя атмосферы. Экспериментальные данные о температуре воздуха были получены в результате экспедиционных метеонаблюдений, а о температуре поверхности — по данным космической гиперспектральной системы MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), каналы 31 и 32 (10.78–11.28 и 11.77–12.27 мкм соответственно). В результате анализа полей температур выявлен интенсивный (до 3.2°C) остров тепла, рассчитанный через температуру подстилающей поверхности, а его средняя интенсивность за период наблюдения заметно превышает характерные данные для городов Европы в зимний период. Также установлено, что в зимних условиях температура воздуха, рассчитанная по данным MODIS, систематически выше температуры воздуха из данных прямых измерений.

Ключевые слова: городской остров тепла, Апатиты, полевые метеорологические измерения, тепловые космические снимки, микроклиматология, MODIS

DOI: 10.7868/S0205961415030069

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечается устойчивый рост научного и общественного интереса к климатическим особенностям мегаполисов — в частности, городскому острову тепла (UHI). Это легко объяснимо, поскольку правильное представление об этом климатическом феномене способно серьезно сэкономить средства городских бюджетов за счет экономии на отоплении в зимний период. В южных регионах экономический эффект проявляется в снижении энергозатрат на кондиционирование жилых помещений в летний период.

Основное внимание специалистов в области городской метеорологии приковано в настоящий момент к мегаполисам зон с теплым климатом — последнее связано с заметным преобладанием крупных городов в этих регионах.

А вот о микроклиматических особенностях городов, расположенных по другую сторону от умеренного пояса, за Полярным кругом, известно гораздо меньше. Имеются лишь единичные исследования, проведенные на Аляске и показавшие

существование в зимнее время островов тепла в относительно небольших городах Барроу и Фэрбанксе. Так, несмотря на относительно небольшую численность населения (35 тыс. чел.) и традиционную для Америки малоэтажную застройку, температура в центре последнего в зимние месяцы в среднем более чем на 1° выше, чем в расположенном за пределами города аэропорту (Magee и др., 1999). Можно ожидать, что в более крупных городах с более плотной застройкой данный эффект будет значительно сильнее. Изучение полярных островов тепла также имеет важный экологический аспект: в условиях полярной ночи при отсутствии солнечной радиации они создаются главным образом за счет антропогенных источников тепла, и их изучение позволит получить данные о тепловом загрязнении окружающей среды.

Однако исследование эффекта UHI по данным прямых метеорологических измерений в приарктической зоне (где расположены, в основном, отечественные города) практически невозможно — количество метеорологических станций здесь крайне невелико. Поэтому особый интерес



Рис. 1. Автоматическая метеорологическая станция (АМС) Davis Vantage Pro 2 (слева), термодатчики iButton (в центре) и пример их установки в ходе исследования (справа).

представляют спутниковые данные и специализированные экспедиционные кампании.

Цель данной работы — исследование перспектив дистанционного изучения городского острова тепла в полярных широтах на примере российского г. Апатиты (Мурманская обл.). Он заметно превосходит Барроу и Фэрбанк по площади и населению. В то же время его равнинное положение, которое исключает влияние инверсий на температурный режим городской территории, высокая плотность застройки, а также низкие зимние температуры, определяющие большие энергозатраты на отопление, делают его одним из лучших мест для изучения эффекта острова тепла полярных городов.

В работе проводится сравнение экспериментальных данных о термической структуре города в зимний период с данными о температуре поверхности, полученными по космическим снимкам в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне (тепловым космическим снимкам). Подспутниковый эксперимент проходил на территории г. Апатиты с 26 января по 4 февраля 2014 г.

Снимки многоканального спектрорадиометра MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) являются ценным материалом для изучения островов тепла городов, хотя их применение в этой области и ограничено. Эти приборы установлены на спутниках NASA серии EOS — Terra и Aqua. Оба спутника находятся на круговых субполярных солнечносинхронных орбитах высотой 705 км, и их работа скоординирована таким образом, чтобы они получали сопоставимые данные. Спутник Terra запущен 18 декабря 1998 г., спутник Aqua — немного позже, 4 мая 2002.

Гиперспектральная система MODIS осуществляет съемку в 36 каналах видимого, ближнего, среднего и теплового ИК-диапазонов спектра. Нас интересуют данные каналов 31 и 32 (10.78–11.28 и 11.77–12.27 мкм соответственно), в которых фиксируется интенсивность теплового излучения земной поверхности, и которые приходятся на диапазон, соответствующий максимуму собственного излучения Земли (10–12 мкм).

Пространственное разрешение снимков, получаемых на этих каналах, — 1000 м.

Система MODIS производит съемку в нескольких каналах теплового ИК-диапазона, что позволяет с высокой точностью производить восстановление температур земной поверхности по алгоритму расщепленного окна прозрачности. По этой причине снимки MODIS используются для оценки точности алгоритмов восстановления температуры земной поверхности из снимков других приборов, например ТМ и ETM+ (Li et al., 2004). Для нашей задачи важным преимуществом является большой пространственный охват этих снимков, что позволяет оценивать размеры крупных островов тепла, а также сопоставлять острова тепла разных городов друг с другом (Hung et al., 2006; Cheval et al., 2009; Imhoff et al., 2010). Однако, несмотря на преимущества, снимки системы MODIS характеризуются существенным недостатком, который особенно заметен при исследовании островов тепла небольших городов (как, например, Апатиты) — низким пространственным разрешением. В отличие от снимков более высокого пространственного разрешения, например, систем ТМ, ETM+, ASTER или TIRS, по снимкам системы MODIS сложнее выявить внутреннюю структуру острова тепла. Использование в данной работе именно снимков системы MODIS обосновывается отсутствием снимков более высокого разрешения на исследуемую территорию за период проведения полевых наблюдений. Но в нашем случае использование снимков системы MODIS вполне оправдало себя.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При полевых измерениях для получения прямых данных о термической структуре приземного слоя воздуха на высоте 2 м в пределах г. Апатиты использовались два следующих типа приборов:

1) автоматические метеостанции (АМС) Davis Vantage Pro 2 (рис. 1, слева), измеряющие температуру, влажность, давление, скорость и направление ветра, и хорошо себя зарекомендовавшие в

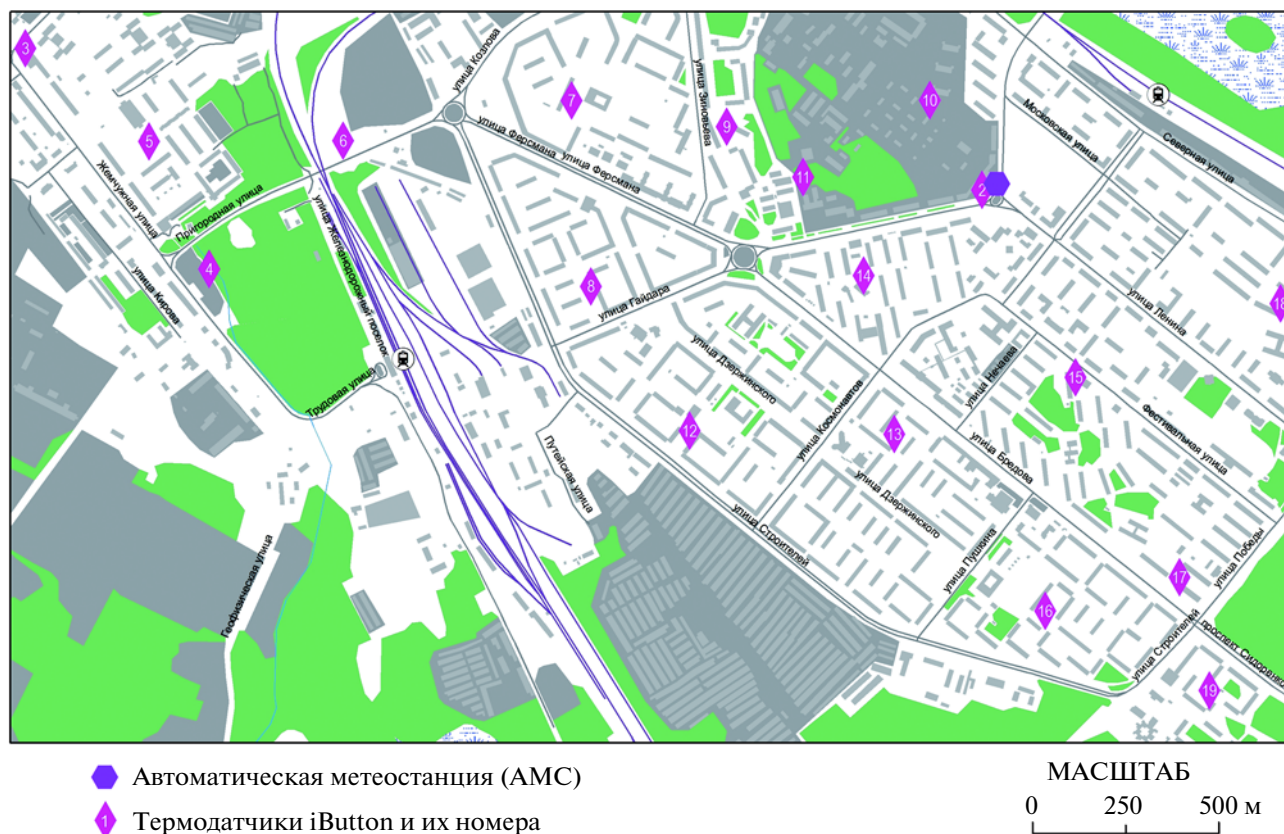


Рис. 2. Расположение датчиков и АМС на территории г. Апатиты.

отечественных исследованиях благодаря относительно низкой стоимости, надежности и хорошей точности измерений температуры воздуха (0.5°C);

2) термодатчики iButton американской фирмы Maxim Integrated (<http://www.maximintegrated.com/>), представляющие собой измеритель и дата-логгер температуры воздуха (с точностью 0.5°C) в металлическом корпусе небольшого размера (рис. 1, по центру и справа).

Термодатчики iButton размещались относительно равномерно по территории города и его окрестностям и устанавливались на стандартной высоте измерений 2 м (рис. 1, справа). Схема расположения средств измерений показана на картах на рис. 2. Фоновая АМС, не отмеченная на карте, была установлена к западу от города на берегу оз. Имандра.

Установленные в ходе экспедиции приборы работали с 28 января по 03 февраля 2014 в г. Апатиты, частота измерений составляла 10 мин.

Информация о температуре земной поверхности получена из тепловых космических снимков системы MODIS. В работе использован продукт, содержащий данные о температуре земной поверхности, рассчитанной по значениям интенсивности теплового излучения и параметрам ат-

мосферы – MOD10A1 (по данным спутника Terra) и MYD10A1 (по данным спутника Aqua), коллекция данных – 5 (самая последняя версия данных на настоящее время). Продукты MOD10A1 и MYD10A1 распространяются в формате *.hdf бесплатно через систему EOSDIS (NASA's Earth Observing System Data and Information System). Продукты MOD10A1 и MYD10A1 включают несколько слоев данных, представленных в синусоидальной проекции. Для получения наглядной картины распределения температур земной поверхности необходимо провести геометрическое трансформирование слоев, преобразовать их в удобный для обработки формат и получить значения температур земной поверхности в градусах Цельсия.

Для изменения проекции данных и преобразования их в другие растровые форматы служит программное обеспечение MRT (MODIS Reprojection Tool), распространяемое бесплатно для зарегистрированных пользователей EOSDIS. Слои были преобразованы в проекцию UTM, зона N36, растровый формат *.tiff.

Данные о температуре земной поверхности содержатся в слоях LST_Day_1km и LST_Night_1km. Чтобы преобразовать их в Кельвины, необходимо пересчитать значения всех пикселей слоев в соответствии с формулой

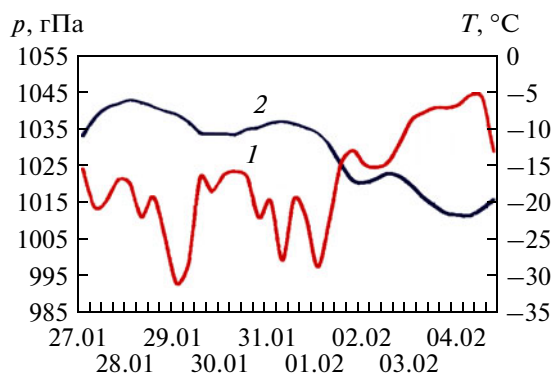


Рис. 3. Ход температуры воздуха на высоте 2 м и давления на уровне моря в период эксперимента (по данным метеостанции г. Апатиты Мурманского УГМС).

$$LST = 0.02R, \quad (1)$$

где LST — значение температуры поверхности в Кельвинах, R — исходные значения яркости пикселей.

Из слоев `Day_view_time` и `Night_view_time` получена информация о времени регистрации пикселей, приходящихся на территорию города Апатиты. Для расчета температуры температурой воздуха в приземном слое атмосферы использована зависимость (Niclos et al., 2014)

$$SAT = 0.94LST + 19.3, \quad (2)$$

где SAT — температура приземного слоя атмосферного воздуха в Кельвинах, LST — температура земной поверхности в Кельвинах.

Существует несколько вариантов зависимости между температурой земной поверхности, полученной из спутниковых данных, и температурой воздуха в приземном слое атмосферы, причем от-

дельно выделяются зависимости для дневных и ночных данных. Зависимость (2) получена для ночных условий на востоке Испании. Среднеквадратическая погрешность этой зависимости оценивается в 1.69°C . Если сравнивать результаты расчета температуры воздуха в приземном слое атмосферы по этой формуле с расчетами по другим, более сложным, приведенным в (Niclos et al., 2014), получается, что зависимость (2) не уступает другим в точности. Поэтому из-за простоты расчета авторы остановили свой выбор именно на этой зависимости.

Были выполнены расчеты и по аналогичной зависимости, но для дневных условий. Результаты оказались неудовлетворительными, что, видимо, связано с преобладанием устойчивой стратификации в зимнем атмосферном пограничном слое в полярных регионах, характерной и для ночного пограничного слоя умеренных широт.

При анализе данных мы исходим из предположения, что небольшие плавные перепады рельефа (до 20 м в центральной части) не должны оказывать заметного влияния на температурное поле изучаемого района.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ синоптических процессов в сочетании с анализом данных наблюдений в период экспедиции позволил выделить два синоптических периода (рис. 3). В первый период (26 января–1 февраля) Кольский п-ов находился на периферии мощного (до уровня 500 гПа) блокирующего антициклона (рис. 4а), под влиянием которого оказалась обширная территория — Восточная Европа, вся ЕТР, Западная и Восточная Сибирь (рис. 4б). Высокое атмосферное давление (1035–

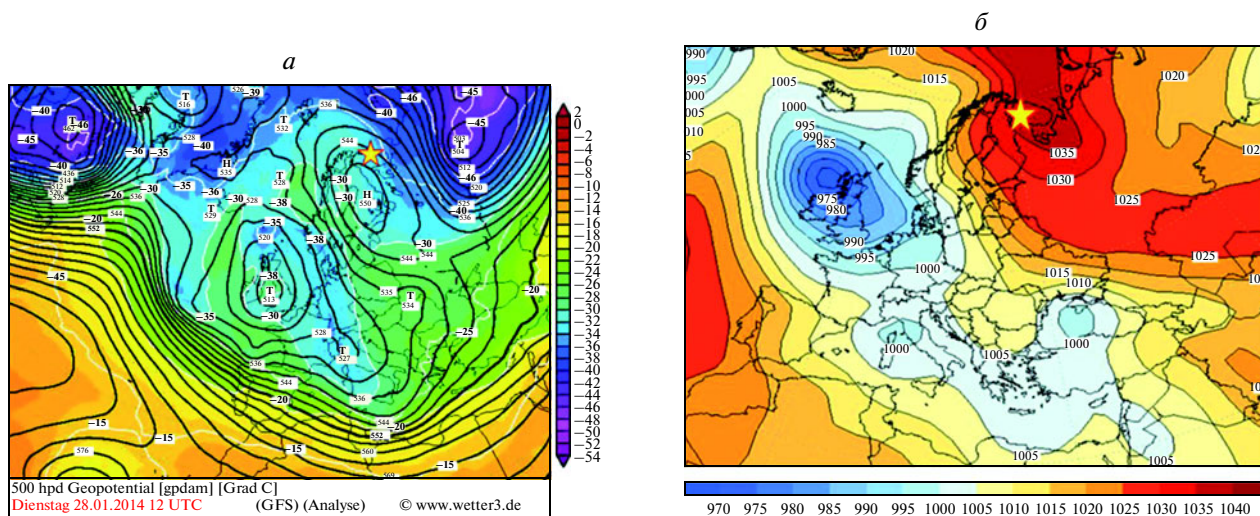


Рис. 4. а — Геопотенциальная высота (изолинии) и температура (цвет) на поверхности 500 гПа 28.01.2014 12 UTC (<http://www.wetterzentrale.de>); б — давление на уровне моря 27.01.2014 12 UTC (по данным реанализа NCEP/NCAR).

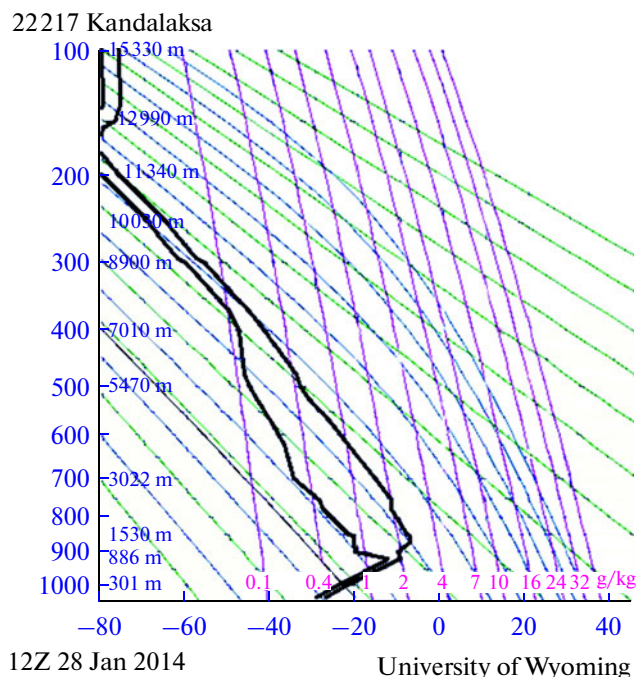


Рис. 5. Аэрологическая диаграмма 28.01.2014 12 UTC (аэрологическая станция в г. Кандалакша, <http://weather.uwyo.edu>).

1045 гПа) сохранялось в течение всего периода. Наблюдалась морозная, безветренная, преимущественно ясная погода с незначительным баллом подынверсионной облачности во второй половине периода.

В условиях ясной антициклональной погоды происходило интенсивное радиационное выхолаживание, в этот период зафиксирован температурный минимум за весь период наших наблюдений: по данным АМС в ночь с 31 января на 1 февраля в центре г. Апатиты температура опустилась до -22.6°C (-27.4°C в пригороде). В течение первого синоптического периода наблюдались инверсии, мощность которых достигала 18–20°C/1.5 км (рис. 5) Из-за лучших условий облачности для последующего анализа был выбран именно этот синоптический период. О континентальном характере господствующей в первый период воздушной массы свидетельствует низкое интегральное влагосодержание в столбе воздуха — до 2.6 кг/м².

Из всех рассматриваемых спутниковых снимках была выделена территория 6×8 км, охватывающая центральную часть города. После выделения интересующей территории были отобраны снимки, количество и расположение пикселей которых было достаточно для исследования городского острова тепла и его связи с островом тепла, выявленным по измерениям температуры приземного слоя воздуха: снимки за 29 января,

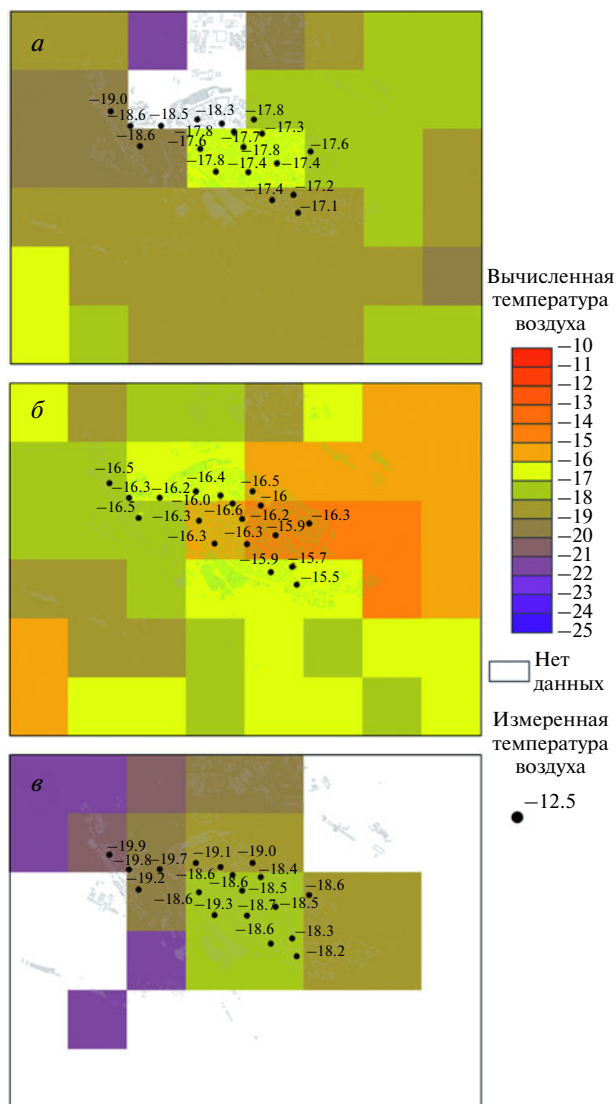


Рис. 6. Сравнение температур воздуха, полученных по результатам прямых измерений и рассчитанных по данным космических снимков системы MODIS: а — 29 января, 23:40; б — 30 января, 03:40; в — 31 января, 02:40.

23:40; 30 января, 03:40; 31 января, 02:40 (по Московскому времени).

На рис. 6 и в табл. 1 приведено взаимное соотношение температуры воздуха, рассчитанной по данным MODIS, и температуры воздуха по данным установленной сети датчиков iButton. В табл. 2 сравниваются значения SUHI — “поверхностного острова тепла — Surface Urban Heat Island” и UHI.

Как видно из табл. 1, пространственная амплитуда рассчитанных значений острова тепла по спутниковым данным в среднем составляет 2.7°C , в то время как амплитуда температуры воздуха в пределах города — Urban Heat Island (UHI) всего 1.6°C . Также хорошо заметно систематическое завышение абсолютных температур воздуха

Таблица 1. Температура воздуха, восстановленная из данных MODIS, и данные прямых измерений температуры воздуха датчиками iButton

Дата, время	Данные	Среднее значение в пределах городской черты, °C	Диапазон значений (мощность острова тепла), °C	В центральной части города, °C
29 января, 23:40	MODIS	–17.1	2.7	–15.7
	Данные прямых измерений iButton	–17.8	1.9	–17.6
	ΔT , °C	0.7		1.9
30 января, 03:40	Данные MODIS	–15.3	3.2	–14.9
	Данные прямых измерений iButton	–16.2	1.1	–16.2
	ΔT , °C	0.9		1.3
31 января, 02:40	Данные MODIS	–17.4	2.3	–16.6
	Данные прямых измерений iButton	–18.9	1.7	–18.7
	ΔT , °C	1.5		2.1
Среднее значение	Данные MODIS	–16.6	2.7	–15.7
	Данные прямых измерений iButton	–17.6	1.6	–17.5
	ΔT , °C	1.0		1.8

Таблица 2. Сравнение средних за период данных о температуре воздуха и подстилающей поверхности, восстановленных из данных MODIS, с данными прямых измерений температуры воздуха датчиками iButton

Температура	Среднее значение в пределах городской черты, °C	Диапазон значений (мощность острова тепла), °C	В центральной части города, °C
Температура воздуха, MODIS	–16.6	2.7	–15.7
Температура поверхности (асфальт, почва, снег), MODIS	–22.00	4.4	–19.9
Данные прямых измерений iButton	–17.6	1.6	–17.5

по данным MODIS (чем ближе к центру города, тем сильнее). Поскольку произвести точные измерения температуры подстилающей поверхности, которые были бы синхронны по времени со спутниковыми данными, в городе сложно, приходится анализировать лишь различия между UHI, полученные разными методами. Температура поверхности стабильно ниже температуры воздуха, что вполне естественно для ночного времени и условий температурной инверсии.

Данные об острове тепла (UHI) и прямые данные о поверхностном острове тепла (SUHI) (табл. 2) хорошо соотносятся друг с другом, однако пространственный размах последнего почти в 3–4 раза больше среднего для европейских городов (1.7 ± 0.4 град в дневное время и 0.4 ± 0.4 в ночное по данным Peng et al. (2011)). Это можно объяснить спецификой городов, расположенных за

Полярным кругом. Среднесуточная разница в несколько градусов между температурой воздуха, осредненной по всем точкам, и температурой подстилающей поверхности, осредненной по всем пикселям MODIS, представляется вполне разумной с точки зрения классической микроклиматологии. Подстилающая поверхность холоднее воздуха, что связано с устойчивой стратификацией приземного слоя атмосферы, наблюдавшейся во время экспедиционных наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы данной работы:

1. На всех использованных тепловых космических снимках проявляется как поверхностный

остров тепла (SUHI) в районе плотной застройки Апатит, ограниченном улицами Ферсмана, Строителей, Победы, Северной, так и классический (UHI). Различия температуры поверхности между указанным районом и окружающей местностью достигают 4–5°C.

2. Для ночного периода в зимнее время в Апатитах данные дистанционного зондирования температуры воздуха удовлетворительно соотносятся с данными прямых измерений с помощью термодатчиков. Ошибка не превышает описанную в (Niclos et al., 2014) ошибку метода, но абсолютные значения температуры в среднем на градус завышены.

Впервые для города, расположенного за Полярным кругом, были синхронно оценены поверхностный остров тепла (SUHI) и классический городской остров тепла (UHI). Полученные нами данные не всегда совпадают с заключениями предыдущих авторов об интенсивности поверхностного острова тепла европейских городов для зимнего периода, что, по-видимому, связано с положением г. Апатиты за Полярным кругом.

Также был рассмотрен вопрос о связи значений температуры поверхности и температуры воздуха в условиях Апатит. По данным MODIS интенсивность острова тепла (UHI) превышает аналогичную по данным прямых измерений в среднем на 1°C. Но для условий сильных вертикальных инверсий температуры поверхность в среднем является стабильно более холодной (на 4–5°C в пределах всего города), что соответствует теоретическим представлениям.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта, номер проекта “14-05-31384 мол_a”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cheval S., Dumitrescu A.* The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images // *Theor. and Appl. Clim.* 2009. V. 96. P. 145–153.
- Hung T., Uchihama D., Ochi S., Yasuoka Y.* Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities // *Int. J. Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2006. V. 8. P. 34–48.
- Li F., Jackson T.J., Kustas W.P., Schmugge T.J., French A.N., Cosh M.H., Bindlish R.* Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 92. P. 521–534.
- Imhoff M.L., Zhang P., Wolfe R.E., Bounoua L.* Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA // *Rem. Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 504–513.
- Magee N., Curtis J., Wendler G.* The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // *Theor. Appl. Clim.* 1999. V. 64(1, 2). P. 39–47.
- Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V.* Land Surface Air Temperature Retrieval from EOS-MODIS Images // *Geosci. Rem. Sens. Lett., IEEE.* 2014. V. 11. № 8. P. 1380–1384.
- Oke T.R.* Boundary layer climates. L., Routledge, 1988. 435 p.
- Peng S. et al.* Surface urban heat island across 419 global big cities // *Environ. Sci. & Technol.* 2011. V. 46. № 2. P. 696–703.
- Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T.* Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval // *Rem. Sens. Environ.* 2006. V. 104. P. 211–225.

Mapping of Arctic Cities Urban Heat Island Based on the Composition of Field Meteorological Measurements and Satellite-Derived Imagery (Example of Apatity, Kola Peninsula)

P. I. Konstantinov, M. Y. Grishchenko, M. I. Varentsov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow

In this paper the results of the complex Urban Heat Island (UHI) and Surface Urban Heat Island (SUHI) study (air temperature and surface temperature) for Polar city Apatity is shown. For calculations of air temperatures surface temperature obtained from satellite images is used. Experimental data on air temperature were obtained by direct meteorological observations, and surface temperature data from satellites hyperspectral system MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), channels 31 and 32 (10.78–11.28 mm and 11.77–12.27 microns, respectively). Results show the high intensity of SUHI (up to 3.2 degrees Celcius) during winter time in Apatity, that is much higher than mean for European cities for this season. Also, in the winter air temperature is calculated according to MODIS, systematically higher than the air temperature data from direct measurements.

Keywords: urban heat island, Apatity, field meteorological measurements, thermal infrared satellite-derived imagery, MODIS, microclimatology