ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2021, № 2, с. 64–76

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ДЛЯ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ

© 2021 г. М. И. Варенцов[a, c, e, *], М. Ю. Грищенко[b, d], П. И. Константинов[b, e]

[a] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*

[b] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия*

[c] *Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

[d] *Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", факультет географии и геоинформационных технологий, Москва, Россия*

[e] *Центр смарт-технологий устойчивого развития городских экосистем в условиях глобальных изменений РУДН, Москва, Россия*

**E-mail: mvar91@gmail.com*

Поступила в редакцию 26.08.2020 г.

Статья посвящена сравнению трех подходов к изучению микроклимата территории на примере городов Российской Арктики в зимних условиях: по данным тепловых космических снимков высокого пространственного разрешения со спутника Landsat 8 (1); по данным космических снимков низкого разрешения съемочной системы MODIS (2) и по данным прямых измерений температуры приземного слоя воздуха (3). В качестве последних использованы наблюдения автоматических метеостанций и термодатчиков сети UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) и метеостанций Росгидромета. Рассмотрено два способа расчета температуры земной поверхности по снимкам со спутника Landsat 8: с применением атмосферной коррекции снимков с использованием модели переноса излучения MODTRAN и заданием табличных значений коэффициентов излучения для различных типов поверхности, и без атмосферной коррекции. Работа проведена на примере городов Апатиты, Воркута, Салехард, Надым и Новый Уренгой. Показано, что значения температуры поверхности, рассчитанные по снимкам со спутника Landsat 8 без использования атмосферной коррекции, согласуются с данным MODIS и данными наблюдений лучше, чем результаты расчетов с использованием атмосферной коррекции. Это указывает на неопределенность задания коэффициента излучения поверхности. Для ряда случаев показано, что пространственная изменчивость температуры поверхности и воздуха тесно связаны, причем оба вида данных показывают наличие эффекта городского острова тепла с разностью температуры между городом и окрестностями до 4°C в дневное время суток. Такие результаты принципиально отличаются от результатов, полученных ранее для более низких широт, и указывают на перспективность использования космических данных высокого разрешения для картографирования и исследования микроклимата арктических городов в зимних условиях.

Ключевые слова: климат города, городской остров тепла, Landsat, MODIS, дистанционное зондирование, тепловые космические снимки, атмосферная коррекция, микроклимат, коэффициент излучения, Арктика

DOI: 10.31857/S0205961421020093

ВВЕДЕНИЕ

Температура воздуха и подстилающей поверхности являются важнейшими параметрами окружающей среды. Востребованной, но не имеющей на настоящий момент универсального решения задачей является получение детализированных температурных данных для исследований на локальном пространственном масштабе (Shahraiyni, Sodoudi, 2017). Данная задача особенно актуальна для урбанизированных территорий, характеризующихся высокой термической неоднородностью и локальными климатическими особенностями, такими как городской остров тепла (далее – ОТ) (Ландсберг, 1983; Oke et al., 2017). Детализированные температурные данные необходимы как для фундаментальных исследований городского климата, так и для учета его особенностей в прикладных задачах – например, при оценке условий термического комфорта населения (Ho et al., 2016; Shandas et al., 2019), в эпидемиологических иссле-

дованиях (Mironova et al., 2019), в градостроительном планировании (Svensson, Eliasson, 2002). Перспективным источником детализированных температурных данных являются тепловые космические снимки высокого разрешения (Weng, 2009). Однако их использование требует решения ряда методологических вопросов, касающихся как их обработки, так и интерпретации результатов. В частности, важно учитывать различия между температурой приземного воздуха, определяемой обычно для высоты 2 м над поверхностью (далее – SAT, от англ. Surface Air Temperature), и восстанавливаемой по спутниковым данным температурой земной поверхности (далее – LST, от англ. Land Surface Temperature). Эти параметры очевидным образом взаимосвязаны, однако их связь имеет крайне сложный характер и зависит от множества факторов, включая свойства поверхности, время суток, сезон года и синоптические условия. Как следствие, картина ОТ по наземным и космическими данным может существенно различаться (Mathew et al., 2018; Niclos et al., 2014; Varentsov et al., 2019).

Устойчивый рост научного и общественного интереса к исследованиям в области городской климатологии и смежных наук отмечается в последние десятилетия. В настоящему времени обширные знания в этой области получены для умеренных и тропических широт (Oke et al., 2017), однако высокие широты до недавнего времени были практически не охвачены такими исследованиями. Характерные физико-географические условия Арктики и субарктики – смена полярного дня и ночи, преобладание зимой устойчивой стратификации атмосферы (Wetzel, Brümmer, 2011; Климатические характеристики..., 1983) – не позволяют вслепую экстраполировать на эти регионы знания о городском климате, полученные для более южных широт. Недавние исследования, выполненные для ряда городов Арктической зоны РФ по данным экспериментальных метеорологических наблюдений и тепловых космических снимков системы MODIS, позволили получить первые результаты о микроклимате северных городов и их островах тепла, ярко выраженных в зимний сезон (Варенцов и др., 2014; Константинов и др., 2015; Konstantinov et al., 2018; Miles, Esau, 2017; Varentsov et al., 2018). Однако вопрос о взаимосвязи наземных и космических температурных данных для городов высоких широт ранее не изучался детально, что осложняет интерпретацию и обобщение результатов, полученных различными способами. Кроме того, в предшествующих работах не рассматривался опыт использования тепловых космических снимков высокого разрешения, наиболее перспективных для изучения пространственной изменчивости температуры на внутригородском масштабе.

Целью данной работы является оценка применимости космических температурных данных высокого разрешения для исследования микроклимата городов Арктической зоны РФ для зимних условий путем их сопоставления с космическими данными низкого разрешения и результатами контактных наблюдений температуры приземного воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регионы исследования

Рассматриваемые города включают Апатиты (Мурманская область), Воркуту (республика Коми), Салехард, Надым и Новый Уренгой (Ямало-Ненецкий автономный округ). Их объединяет расположение в высоких широтах (севернее полярного круга или вблизи него), схожесть размера, численности населения (от 45 тыс. человек в Надыме до 115 в Новом Уренгое) и характера застройки. Жилая часть городов плотно застроена многоэтажными домами высотой в 5–9 этажей, к ней примыкают территории промышленных предприятий. В Салехарде также представлена застройка частными малоэтажными домами. Различаются города, в первую очередь, условиями вмещающего рельефа. Город Апатиты расположен в холмистом рельефе, между Хибинскими горами и оз. Имандра. Воркута, Салехард и Новый Уренгой расположены на берегах рр. Воркута, Обь и Седэяха соответственно, поэтому неоднородность рельефа тоже присутствует. Надым расположен на равнинной территории в окружении практически плоского рельефа. Для каждого из регионов область исследования включает в себя сам город и окружающую его территорию размером примерно 20 × 20 км.

Данные наблюдений за температурой воздуха

Нами использованы данные наблюдений за температурой воздуха, выполненные в рассматриваемых городах в рамках кампании UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) (Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018) в 2016–2018 гг. Программа измерений UHIARC включает установку в центральной части каждого из городов (кроме Нового Уренгоя) стационарно работающей автоматической метеостанции (далее – АМС) Davis Vantage Pro 2, а также развертывание сети термодатчиков iButton в городе и его окрестностях на продолжительный период (более 1 мес. в зимний сезон). Измерения выполняются на стандартной высоте 2 м над поверхностью (АМС установлены на специальных опорах, термодатчики – на ветвях деревьев и кустарников). Также использованы наблюдения за температурой воздуха на расположенных за городской чер-

той метеостанциях Росгидромета (далее – МС). Дискретность измерений составляет 5 мин для АМС, 1 ч для термодатчиков и 3 ч для метеостанций Росгидромета (6 ч в Апатитах).

Для анализа выбраны периоды, когда для каждого города проводились наиболее детальные наблюдения с использованием термодатчиков iButton: зима 2016–2017 гг. для Надыма и Нового Уренгоя, февраль 2017 г. для Воркуты и Салехарда, зима 2017–2018 гг. для г. Апатиты. Данные наблюдений за температурой воздуха доступны для Надыма для 15 точек (МС, АМС, 13 термодатчиков); в Салехарде и Воркуте – в 9 точках (МС, АМС, 7 термодатчиков); в Апатитах – в 23 точках (МС, АМС, 21 термодатчик); в Новом Уренгое – в 6 точках (МС и 5 термодатчиков).

Космические данные высокого разрешения

Новизна данного исследования заключается в использовании температурных данных, полученных в результате обработки тепловых космических снимков высокого пространственного разрешения со спутника Landsat 8. Данный спутник запущен в 2013 г. и проводит съемку поверхности Земли в каналах оптического и среднего инфракрасного диапазона (съемочная система OLI), а также в двух каналах теплового инфракрасного диапазона (съемочная система TIRS). Съемочная система TIRS фиксирует собственное излучение объектов в диапазоне 10.6–12.5 мкм. Пространственное разрешение регистрируемых снимков составляет 100 м. Снимки представлены в открытом доступе на портале Геологической службы США (https://earthexplorer.usgs.gov/).

Работа со спутниковыми данными Landsat осложняется отсутствием общепринятого алгоритма расчета LST. Нами использован одноканальный алгоритм расчета LST по данным 10-го канала космических снимков со спутника Landsat 8 с атмосферной коррекцией (Грищенко, Чернулич, 2019). Одноканальный алгоритм предполагает меньшую точность результата расчета, чем алгоритм расщепленного окна прозрачности, но сильно выигрывает в простоте расчетов. Необходимые для коррекции параметры атмосферы определены по модели радиационного переноса MODTRAN в рамках инструмента Atmospheric Correction Parameter Calculator (http://atmcorr.gsfc.nasa.gov; Barsi et al., 2005) с использованием вертикальных профилей температуры и влажности по данным реанализа NCEP/NCAR для нижних 30 км и стандартных значений по модели “mid-latitude winter” выше 30 км.

Определение LST по снимкам Landsat требует задания коэффициента излучения (σ), зависящего от свойств поверхности (Горный и др., 1993; Криксунов, 1978; Станкевич и др., 2015). Значения σ обычно определяются либо по результатам классификации объектов с последующим присвоением каждому объекту табличных значений, либо на основе вегетационного индекса NDVI (Чинь и др., 2015). Второй метод, очевидно, не применим для заснеженных арктических ландшафтов. В данной работе значение σ задавалось по результатам автоматизированного дешифрирования многозональных космических снимков методом максимального правдоподобия с выделением заснеженных поверхностей без древесной растительности, заснеженных поверхностей с древесной растительностью, техногенных объектов (рис. 1). Каждому их этих типов поверхности назначены значения σ согласно (Криксунов, 1978): 0.90, 0.92, 0.93 соответственно. Далее эти значения использовались в модуле атмосферной коррекции.

Естественным образом возникает предположение о неэффективности использования такого алгоритма атмосферной коррекции для рассматриваемых условий, как по причине несоответствия стандартных моделей атмосферы условиям высоких широт, так и ввиду объективных сложностей определения коэффициента излучения в зимних условиях, когда пространственная дифференциация спектральных характеристик земной поверхности существенно снижается из-за снежного покрова. Поэтому мы осуществили два способа расчета LST – с использованием атмосферной коррекции и без нее (в последнем случае не учитывается ослабление излучения атмосферой, и принимается $\sigma = 1$)

Космические данные низкого разрешения

С целью проверки репрезентативности значений LST, определяемых по спутниковым снимкам высокого разрешения, проведено их сравнение с данными низкого пространственного разрешения (1 км), полученными по спутниковым снимкам съемочной системы MODIS. Данные MODIS содержат значения LST, рассчитанные по алгоритму расщепленного окна прозрачности с учетом атмосферной коррекции с подбором адекватной модели атмосферы. Эти данные многократно верифицированы по результатам контактных измерений; их погрешность составляет менее 2°C (Wan et al., 2004) и менее 1°C в большинстве случаев в диапазоне температур от –10 до 50°C (Wan, 2014). Нами использованы данные, полученные в результате съемки со спутника Terra, а именно растры MOD11A1, доступные на портале NASA Earth Data (https://earthdata.nasa.gov/). Для регионов исследования время регистрации снимков со спутников Terra и Landsat 8 практически совпадает и составляет около полудня по местному времени.

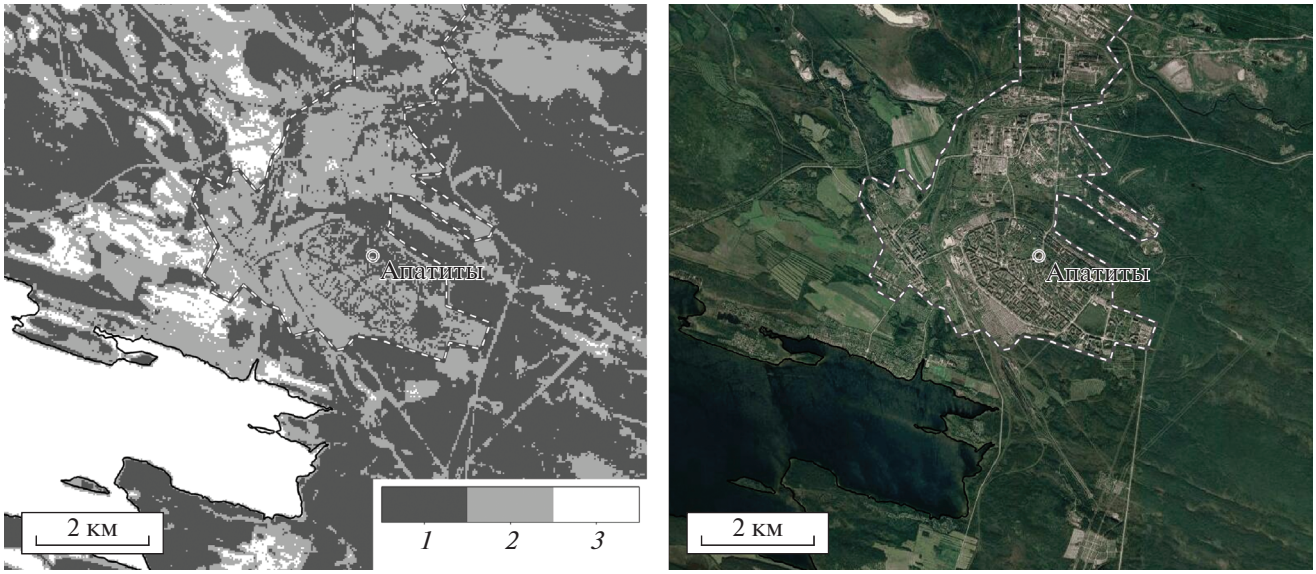

Рис. 1. Результат классификации многозонального снимка съемочной системы OLI (спутник Landsat 8) за 7 марта 2018 г. для территории г. Апатиты (справа) с выделением техногенных объектов (*1*), участков древесной и кустарниковой растительности (*2*) и открытых заснеженных участков (*3*) в сравнении со спутниковым снимком за летний сезон по данным Google Maps (слева). Пунктирной линией показана граница урбанизированной территории, сплошной черной линией – границы наиболее крупных водных объектов.

При анализе данных MODIS в ряде случаев были выявлены систематические различия LST порядка 1–2°C для пикселей, имеющих различное время регистрации. Как правило, растр содержит пиксели со сроком регистрации в два различных момента времени, разнесенные на 1–1.5 ч. Ввиду сложности интерпретации такого смещения при анализе данных, введена специальная коррекция, зависящая от времени регистрации пиксела и минимизирующая среднюю по территории исследования разность LST между соседними пикселами с различным сроком регистрации.

Сравнение разнотипных данных

Сопоставление значений LST, рассчитанных двумя способами по спутниковым снимкам Landsat, с данными низкого разрешения MODIS и с данными наблюдений проведено для снимков района городов Апатиты (за 3 и 19 февраля 2018 г.), Салехард (6, 15 и 22 февраля 2017 г.), Воркута (20 февраля 2017 г.), Надым (за 25 января, 10, 12 и 26 февраля 2017 г.) и Новый Уренгой (29 января 2017 г.). Столь небольшая выборка случаев связана с низкой частотой регистрации спутниковых снимков Landsat (1 раз в 8 дней), значительная часть которых непригодна для использования из-за высокой повторяемости облачной погоды в высоких широтах. Ввиду малого количества снимков для каждого города, все случаи рассматриваются как единая выборка данных. Для сравнения с данными MODIS использованы значения LST, осредненные в пределах пикселов растра с более грубым разрешением. Для сравнения с данными наблюдений использованы средние значения LST по квадрату 3 × 3 пиксела в окрестностях точки наблюдений.

Задачу сравнения спутниковых данных с данными наблюдений осложняет отсутствие затенения термодатчиков iButton, из-за чего они днем нагреваются на солнце, а их показания искажаются (Malevich, Klink, 2011; Ojeh et al., 2016). Возникающая погрешность становится существенна при высоте солнца над горизонтом $h > 4°$ (Konstantinov et al., 2018). В микроклиматических исследованиях периоды с $h > 4°$ можно исключить из рассмотрения при анализе наблюдений термодатчиков, однако эта проблема выходит на первый план при их сравнении со спутниковыми данными, поскольку снимки Landsat регистрируются в районе полудня по местному времени. Для решения данной проблемы, при сравнении значений LST с наблюдениями термодатчиков, использовались следующие значения температуры:

$$T = \min(T_{fact}, T_{int}),$$

где T_{fact} – фактическая температура, зарегистрированная термодатчиком в ближайший к сроку регистрации спутникового снимка момент времени, T_{int} – температура, интерполированная на этот момент времени по двум ближайшим измерениям при $h < 4°$. Для наблюдений АМС бралось значение, ближайшее к сроку регистрации снимка. Для метеостанций Росгидромета проводилась интерполяция значений, измеренных в

Таблица 1. Характеристики сравнения значений LST по данным Landsat, рассчитанных с атмосферной коррекцией (столбцы AC) и без нее (столбцы noAC), и по данным MODIS: средняя ошибка ME, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент пространственной корреляции *R*

Регион	Дата	ME [°C]		RMSE [°C]		*R*		Доля лакун (MODIS)
		AC	noAC	AC	noAC	AC	noAC	
Апатиты	03.02.2018	2.4	–0.6	3.6	2.1	0.25	0.47	0.08
	19.02.2018	2.5	–0.7	3.2	1.7	0.49	0.61	0.04
Салехард	06.02.2017	3.4	1.6	3.8	2.2	0.36	0.46	0.27
	16.02.2017	0.1	0.6	1.4	1.4	0.64	0.72	0.69
	22.02.2017	2.9	1.4	3.0	1.5	0.66	0.73	0.62
Воркута	20.02.2017	4.9	0.0	5.0	0.7	0.62	0.72	0.31
Надым	25.01.2017	2.8	–0.1	2.9	0.6	0.48	0.51	0.12
	10.02.2017	3.0	0.5	3.2	0.8	0.21	0.55	0.71
	12.02.2017	1.8	–0.8	2.1	1.5	0.36	0.38	0.19
	26.02.2017	4.0	1.1	4.3	1.6	–0.10	0.06	0.31
Новый Уренгой	29.01.2017	5.0	0.6	5.0	0.8	0.71	0.76	0.01
Среднее значение		3.0	0.3	3.4	1.4	0.42	0.54	

сроки с дискретностью 3 или 6 ч, на срок регистрации снимка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение спутниковых данных высокого и низкого разрешения

Сравнение LST по данным MODIS со значениями, рассчитанными по снимкам Landsat, показало, что при использовании атмосферной коррекции согласие между двумя видами данных значительно хуже, чем без нее. Во-первых, при использовании коррекции возникает систематическое завышение LST по данным Landsat относительно данных MODIS в среднем на 3°C (табл. 1). Без использования коррекции систематическое смещение близко к нулю, а среднеквадратические ошибки значительно меньше. Во-вторых, пространственное распределение значений LST, рассчитанных без коррекции, лучше согласуется с данными MODIS, что подтверждают значения коэффициентов пространственной корреляции *R* в табл. 1, примеры на рис. 2, а также разброс точек на диаграммах рассеяния на рис. 3. Низкая пространственная корреляция в ряде случаев отчасти связана со значительным количеством лакун (пробелов) в данных MODIS. Несмотря на отсутствие облачности на снимках Landsat, по неочевидным причинам на снимках MODIS для той же территории лакуны занимают до 70% площади (табл. 1).

Безусловно, данные MODIS не являются эталоном. Тем не менее, сравнение значений LST на рис. 2 показывает, что при использовании атмосферной коррекции в поле LST возникают артефакты, которые не согласуются с данными MODIS и необъяснимы с позиций микроклиматологии. Например, это резкие контрасты в поле LST между залесенными и открытыми заснеженными территориями и положительные аномалии LST для последних (например, к северо-западу от г. Надым, на юго-западе от г. Апатиты, на юге от г. Новый Уренгой). Для открытых заснеженных пространств зимой стоит ожидать, напротив, более низких значений температуры по сравнению с лесными массивами (Rouse, 1984). Представляется нереалистичной повышенная температура поверхности рек и озер, закрытых зимой толстым льдом (р. Надым, р. Седэяха, оз. Янтарное к югу от Надыма) и представляющих собой такие же открытые заснеженные пространства. К тому же, они находятся в низинах, где в условиях устойчивой стратификации атмосферы скапливается холодный воздух (Daly et al., 2010; Varentsov et al., 2018).

Данные LST, рассчитанные по снимкам со спутника Landsat 8 без коррекции, напротив, хорошо отражают типичные микроклиматические особенности территории: более низкие температуры в низинах, например в долине р. Надым, и более высокие температуры на сопках к югу от Надыма и в окрестностях г. Апатиты. Зимой в высоких широтах характерны температурные инверсии (Wetzel, Brümmer, 2011; Климатические характеристики... , 1983), из-за чего на возвышенностях оказывается теплее, чем в низинах. Для всех городов прослеживаются положительные аномалии LST для застроенных территорий, характеризующие поверхностный ОТ, с разностью

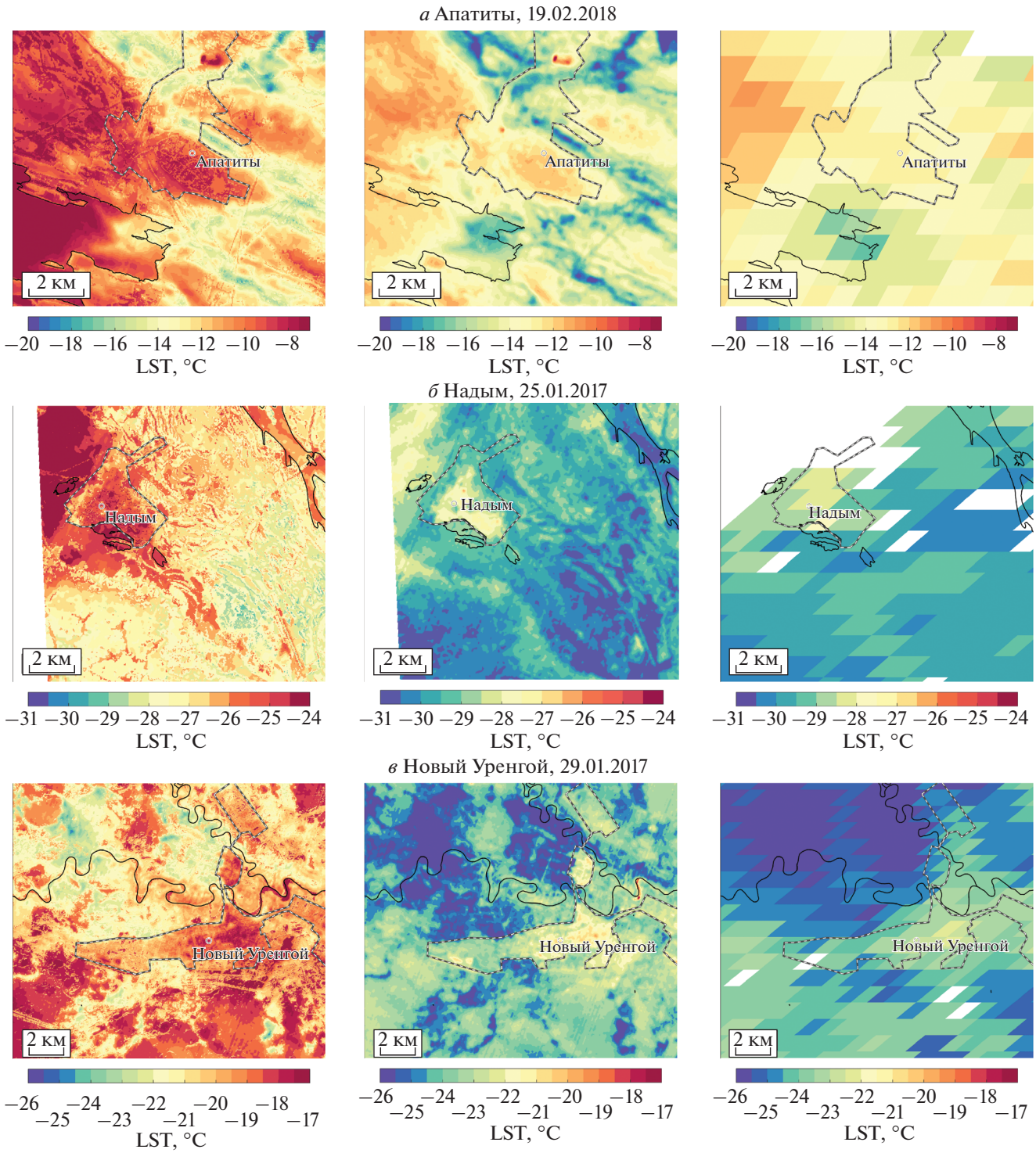

Рис. 2. Значения температуры поверхности (LST) по данным Landsat, рассчитанные с атмосферной коррекцией (слева) и без нее (по центру), и по данным MODIS (слева) на примерах для городов Апатиты (*а*), Надым (*б*) и Новый Уренгой (*в*). Пунктирной линией показана граница урбанизированной территории, сплошной черной линей – границы наиболее крупных водных объектов.

температуры между городом и окружающими ландшафтами до 3–4°C. При этом данные Landsat ожидаемо значительно лучше разрешают пространственную структуру городской температурной аномалии, включая внутригородскую изменчивость LST.

Существенные различия, выявленные между результатами расчета LST по данным Landsat с ат-

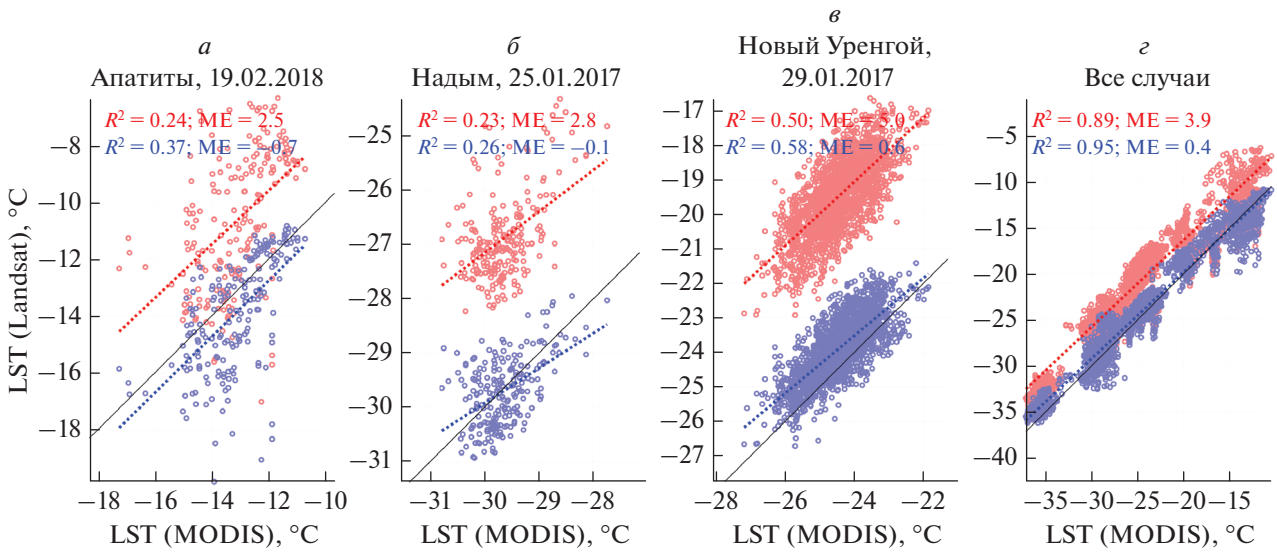

Рис. 3. Сравнение значений температуры поверхности (LST) по данным MODIS и Landsat, рассчитанных с атмосферной коррекцией (красные точки) и без нее (синие точки) для трех случаев, соответствующих рис. 2 (*а–в*), и для всех 11 рассмотренных случаев (*г*). На графиках указаны значения коэффициента детерминации тренда R^2 и средней ошибки ME.

мосферной коррекцией и без нее, могут быть связаны с двумя факторами. Во-первых, можно предположить некорректность задания коэффициента излучения σ в процедуре атмосферной коррекции. Используемые при обработке снимков значения 0.9–0.93 существенно меньше, чем оценка σ по данным MODIS, которая в большинстве случаев близка к 0.99 (растры emis31, emis32 продукта MOD11A1). Разность средних значений σ в значительной степени объясняет систематическое завышение LST относительно данных MODIS при использовании атмосферной коррекции. Точная оценка σ для заснеженной поверхности остается сложной задачей ввиду большого количества влияющих на нее факторов. В литературе оценки σ для снега варьируются от 0.8 (Горный и др., 1993) до близких к единице значений (Hori et al., 2006; Warren, 1982), т.е. в ряде случаев излучательные свойства снега близки к свойствам абсолютно черного тела. Последнее подтверждает релевантность значений σ по данным MODIS.

Во-вторых, при атмосферной коррекции учитывается ослабление излучения столбом атмосферы. Параметры атмосферы, определяемые в рамках инструмента NASA по данным реанализа NCEP/NCAR (Barsi et al., 2005), также могут быть неточны. Однако, даже для пыльной и влажной атмосферы тропиков, чувствительность процедуры коррекции к входным параметрам атмосферы значительно ниже, чем к величине σ (Rosas et al., 2017). С учетом низкого содержания водяного пара и высокой прозрачности зимней атмосферы высоких широт, в нашем случае чувствительность процедуры коррекции к параметрам атмосферы должна быть еще меньше. Значения LST, рассчитанные с атмосферной коррекцией и постоянной σ = 1, отличаются от рассчитанных без коррекции в среднем на 0.5°C. Эта величина сопоставима к чувствительности к изменению σ на 0.01 (при температуре –30°C она составляет ≈0.6°). Таким образом, если принять диапазон неопределенности оценки σ как 0.9–1.0, это будет эквивалентно неопределенности оценки LST в 6°C, что сопоставимо с масштабом ее микроклиматической изменчивости в зимний период. Таким образом, проблема точной оценки σ выходит на первый план при использовании снимков со спутников серии Landsat для исследования микроклимата в высоких широтах в зимний период.

Сравнение спутниковых данных высокого разрешения и наблюдений

Сравнение значений LST, рассчитанных по снимкам Landsat без атмосферной коррекции, с данными контактных наблюдений за температурой воздуха (SAT) в городах и их окрестностях в 9 из 11 случаев показало наличие выраженной взаимосвязи между этими величинами с коэффициентами корреляции R от 0.48 до 0.90 (табл. 2). Среднее значение R составило 0.59 и 0.69 в среднем для 9 случаев с выраженной связью между LST и SAT. Значения LST, рассчитанные с атмосферной коррекцией, характеризуются менее тесной связью с SAT (табл. 2). Это подтверждает предположение о том, что выбранный метод задания пространственно-дифференцируемых значе-

Таблица 2. Характеристики сравнения LST по данным спутника Landsat 8, рассчитанных с атмосферной коррекцией (столбцы AC) и без нее (столбцы noAC), с температурой воздуха SAT по данным наблюдений: средняя ошибка ME, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент пространственной корреляции *R*. Средние значения рассчитаны по всем случаям и, отдельно, по 9 случаям, для которых прослеживается взаимосвязь SAT и LST (исключая 2 случая, выделенных серой заливкой)

Регион	Дата	ME [°C]		RMSE [°C]		R	
		AC	noAC	AC	noAC	AC	noAC
Апатиты	03.02.2018	2.0	–0.9	2.3	1.2	0.84	0.87
	19.02.2018	3.0	–0.4	3.3	1.3	0.87	0.90
Салехард	06.02.2017	0.4	–0.8	1.0	1.0	0.49	0.48
	16.02.2017	–7.1	–6.4	7.3	6.5	–0.04	–0.04
	22.02.2017	1.4	0.0	1.8	1.3	0.71	0.71
Воркута	20.02.2017	1.1	–3.1	1.4	3.4	0.51	0.64
Надым	25.01.2017	2.4	–0.5	2.6	0.9	0.24	0.49
	10.02.2017	3.5	0.6	3.6	0.8	0.56	0.80
	12.02.2017	–0.3	–3.2	1.7	3.5	0.64	0.69
	26.02.2017	–1.4	–4.2	1.7	4.3	–0.12	0.13
Новый Уренгой	29.01.2017	0.1	–3.3	0.8	3.4	0.46	0.67
Среднее (11 случаев)		0.5	–2.0	2.5	2.5	0.47	0.58
Среднее (9 случаев)		1.5	–1.3	2.0	1.9	0.59	0.69

ний σ, используемый при расчетах LST с атмосферной коррекцией, вносит нереалистичные искажения в поле температуры.

Значения LST, рассчитанные без коррекции, в среднем на 2°C ниже значений SAT, а при использовании коррекции, напротив, на 0.5°C выше. Для зимних условий высоких широт занижение температуры поверхности по сравнению с температурой воздуха представляется более реалистичным ввиду преобладания устойчивой стратификации атмосферы и отрицательного радиационного баланса. Дополнительное занижение LST может быть связано с использованием в расчетах без коррекции значения $\sigma = 1$. В отличие от снега, для которого значение σ может быть близко к единице, для городских поверхностей типичные значения σ составляют около 0.9 (Oke et al., 2017). Соответственно, при использовании $\sigma = 1$ значения LST для города должны быть занижены. Максимальны различия LST и SAT для тех же случаев, для которых минимальны коэффициенты корреляции между ними (16.02.2017 для Салехарда и 26.02.2017 для Надыма). Доступные данные не позволяют однозначно интерпретировать причины несогласованности LST и SAT в этих случаях: она может быть связана с особенностями атмосферных процессов, аномалиями оптических свойств заснеженной поверхности и другими факторами. Для оставшихся 9 случаев средняя разность LST и SAT составляет –1.3°C.

Для случаев с наиболее тесной связью LST и SAT оба вида данных отражают характерные микроклиматические особенности исследуемых территорий, включая эффект ОТ (рис. 4). Это видно и на примере окрестностей г. Апатиты с ярко выраженной пространственной изменчивостью загородных температур, так и на примере Салехарда, Надыма и Воркуты, где эффект ОТ выражен более отчетливо на фоне меньшей изменчивости загородных температур. Для региона г. Апатиты оба вида данных показывают характерное превышение температуры на холмах над низинами (Varentsov et al., 2018), а также направленный с востока на запад градиент температуры. Эффект ОТ г. Апатиты, который расположен на одном из холмов, выражен в превышении температуры в центре города на 2–4°C по сравнению с незастроенной частью холма на востоке от города. На примерах для Салехарда и Надыма оба вида данных показывают ОТ с разностью температуры в 3–4°C между городским и загородными точками наблюдений. Для сравнения, типичные экстремумы разности температуры воздуха между городом и окрестностями по данным продолжительных наблюдений UHIARC в этих городах составляют 4–5°C, абсолютные максимумы – около 7°C (Konstantinov et al., 2018). Пример Воркуты менее удачный ввиду малого числа точек изменений и систематического завышения SAT по сравнению с LST, однако и в этом случае оба типа данных указывают на превышение температуры в городе по сравнению с окрестностями.

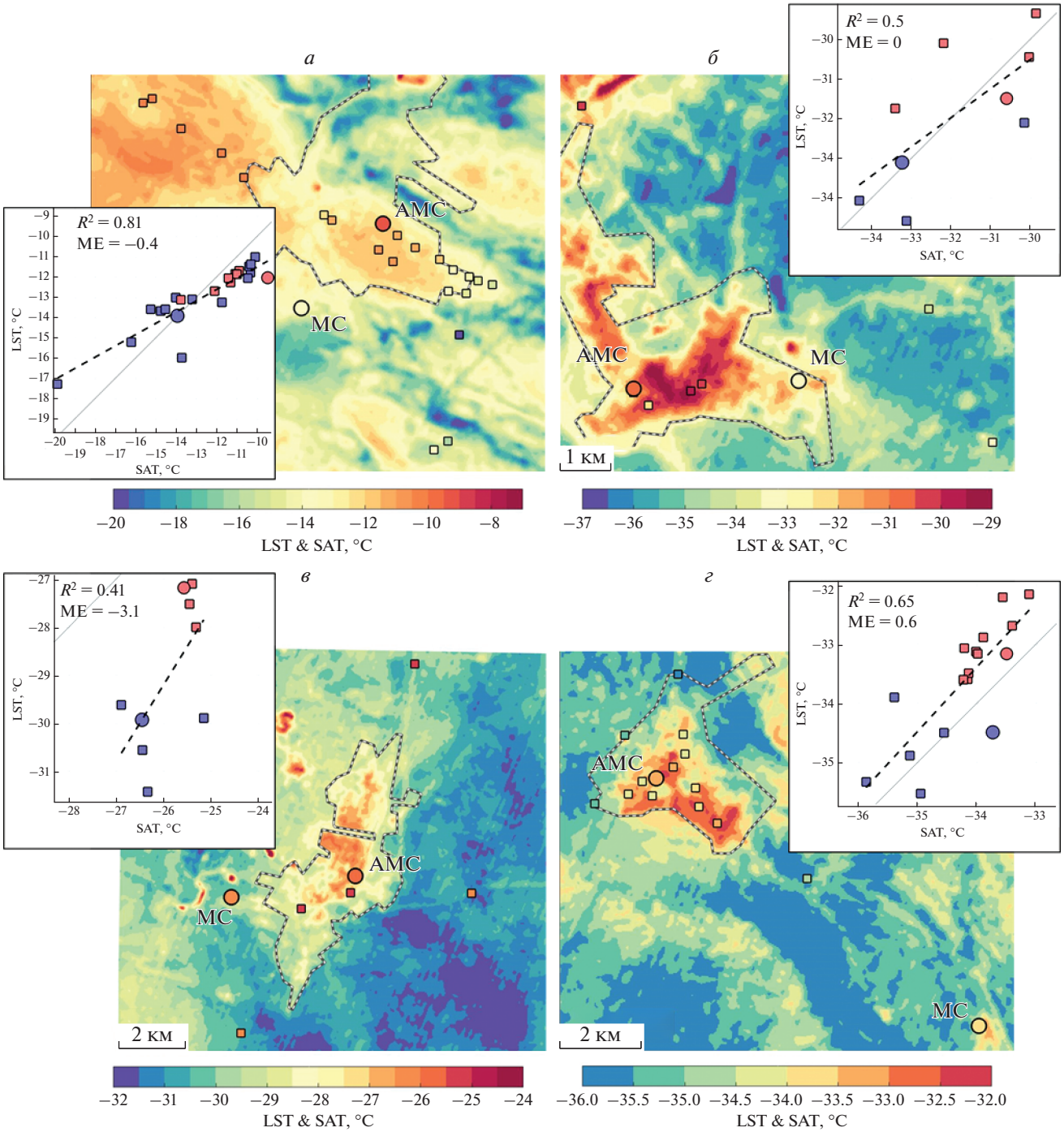

Рис. 4. Примеры сравнения LST по данным снимков Landsat с данными контактных измерений температуры воздуха (SAT) для района г. Апатиты за 19.02.2018 (*а*); района г. Салехарда за 22.02.2017 (*б*); района г. Воркута за 20.02.2017; района г. Надым за 10.02.2017 (*г*). Значения LST показаны цветной заливкой, значения SAT по данным AMC и MC – круглыми пунсонами, по данным термодатчиков iButton – квадратными. На графиках-врезках показано сравнение значений LST и SAT в городских (красные) и загородных (синие) точках наблюдений, пунктирной линией показан линейный тренд, указаны значения коэффициента детерминации тренда R^2 и систематическое смещение ME.

Таким образом, рассмотренные примеры показывают, что для зимних условий высоких широт закономерности распределения температуры воздуха и поверхности в городах и их окрестностях в значительной степени согласованы даже в дневные часы. Такой результат разительно отличается от результатов аналогичных исследований для летних условий более южных широт, показы-

вающих несогласованность значений LST и SAT и пространственной картины ОТ в поле этих величин в дневное время суток (Sheng et al., 2017; Sun et al., 2015; Xiong, Chen, 2017). Так, летним днем разность значений LST в городе и пригородах может достигать десятков °С, но разность значений SAT обычно не превышает 1.5–2°С за счет интенсивного вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы (Varentsov et al., 2019; Voogt, Oke, 2003). Принято считать, что взаимосвязь между городскими аномалиями SAT и LST лучше в ночных условиях. Однако зимой в высоких широтах низкая высота солнца, короткий световой день и высокое альбедо снежного покрова препятствуют существенному прогреву поверхности и формированию перемешенного пограничного слоя атмосферы, благодаря чему даже в дневные часы может сохраняться тесная связь между температурой воздуха и поверхности, что и демонстрируют результаты исследования.

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволяет сделать два важных вывода о перспективах использования космических температурных данных высокого пространственного разрешения в фундаментальных и прикладных микроклиматических исследованиях для урбанизированных территорий высоких широт.

Во-первых, в отличие от умеренных и тропических широт, зимой в высоких широтах, в условиях слабого солнечного нагрева и преобладания устойчивой стратификации атмосферы, пространственное распределение температуры воздуха и поверхности в значительной степени согласовано даже в дневные часы. Также согласуются и характеристики ОТ в поле этих величин. Это упрощает задачу сопоставления результатов микроклиматических исследований, выполненных по данным прямых измерений и космических снимков, и открывает перспективы использования космических снимков высокого разрешения со спутников серии Landsat, регистрируемых в дневное время суток, в задачах картографирования и исследования городского микроклимата. В дальнейшем представляется перспективным использование таких снимков для более детального изучения пространственной изменчивости температуры на внутригородском масштабе.

Во-вторых, показана важность более аккуратного учета пространственной дифференциации коэффициента излучения поверхности (σ) в подобных исследованиях для зимних условий. В нашем исследовании, при использовании табличных значений σ для различных типов поверхности, полученные значения LST показали значительно худшее согласие с данными низкого разрешения MODIS и данными наблюдений за температурой воздуха по сравнению с результатами расчетов LST при задании $\sigma = 1$. Летом, когда пространственные различия LST достигают десятков °С, влияние способа задания σ не столь существенно, однако зимой неопределенность ее оценок оказывается соизмерима с характерным масштабом пространственной изменчивости LST. Соответственно, необходимость максимально точного задания σ выходит на первый план в задачах применения спутниковых данных высокого разрешения в микроклиматических исследованиях в зимний период.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 18-05-00715 А и 20-55-71004 Арктика_т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.

Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.

Грищенко М.Ю., Чернулич К.К. Исследование связи наземных и космических температурных данных на примере островов Врангеля и Кунашир // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 5. С. 566–575.

Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: справочное пособие / под ред. Э.Ю. Безуглая, М.Е. Берлянд. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 328 с.

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) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27–33.

Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.

Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 246 с.

Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съемки // Украинский журн. дистанционного зондирования Земли. 2015. Т. 7. С. 12–21.

Чинь Л.Х., Терехин Э.А., Ву З.Т. Дистанционные методы в изучении коэффициента излучения поверхности по данным многозональной съемки Landsat (на примере района Бак Бинь провинции Бинь Тхуан, Вьетнам) // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 59–68.

Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments // Earth Obs. Syst. X. 2005. V. 5882. P. 58820E.
https://doi.org/10.1117/12.619990

Daly C., Conklin D.R., Unsworth M.H. Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts // Int. J. Climatol. 2010. V. 30. P. 1857–1864.
https://doi.org/10.1002/joc.2007

Ho H.C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M. A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area // Sci. Total Environ. 2016. V. 544. P. 929–938.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.021

Hori M., Aoki T., Tanikawa T., Motoyoshi H., Hachikubo A., Sugiura K., Yasunari T.J., Eide H., Storvold R., Nakajima Y., Takahashi F. In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8–14 μm atmospheric window // Remote Sens. Environ. 2006. V. 100. № 4. P. 486–502.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.001

Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. № 7. P. 75007.
https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84

Malevich S.B., Klink K. Relationships between snow and the wintertime Minneapolis urban heat island // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2011. V. 50. № 9. P. 1884–1894.
https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-05.1

Mathew A., Khandelwal S., Kaul N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities // Energy Build. 2018. V. 159. P. 271–295.
https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062

Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 989.
https://doi.org/10.3390/rs9100989

Mironova V., Shartova N., Beljaev A., Varentsov M., Grishchenko M. Effects of Climate Change and Heterogeneity of Local Climates on the Development of Malaria Parasite (Plasmodium vivax) in Moscow Megacity Region // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. V. 16. № 5. P. 694.
https://doi.org/10.3390/ijerph16050694

Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. V. 11. № 8. P. 1380–1384.
https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2293540

Ojeh V., Balogun A., Okhimamhe A. Urban-Rural Temperature Differences in Lagos // Climate. 2016. V. 4. № 2. P. 29.
https://doi.org/10.3390/cli4020029

Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
https://doi.org/10.1017/9781139016476

Rosas J., Houborg R., McCabe M.F. Sensitivity of Landsat 8 surface temperature estimates to atmospheric profile data: A study using MODTRAN in dryland irrigated systems // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 1–27.
https://doi.org/10.3390/rs9100988

Rouse W.R. Microclimate at Arctic Tree Line 1. Radiation Balance of Tundra and Forest // Water Resour. Res. 1984. V. 20. № 1. P. 57–66.
https://doi.org/10.1029/WR020i001p00057

Shahraiyni H.T., Sodoudi S. High-Resolution Air Temperature Mapping in Urban Areas // 2017. V. 21. № 6A. P. 2267–2286.
https://doi.org/10.2298/TSCI150922094T

Shandas V., Voelkel J., Williams J., Hoffman J. Integrating satellite and ground measurements for predicting locations of extreme urban heat // Climate. 2019. V. 7. № 1. P. 5.
https://doi.org/10.3390/cli7010005

Sheng L., Tang X., You H., Gu Q., Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China // Ecol. Indic. 2017. V. 72. P. 738–746.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.009

Sun H., Chen Y., Zhan W. Comparing surface- and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data // Int. J. Remote Sens. 2015. V. 36. № 21. P. 5448–5465.
https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101504

Svensson M.K., Eliasson I. Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning // Landscape and Urban Planning. 2002. V. 61. № 1. P. 37–54.
https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00076-2

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. № 23. P. 17573–17587.
https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018

Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H. Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geogr. Environ. Sustain. 2019. V. 12. № 4. P. 74–95.
https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-10

Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sens. Environ. 2003. V. 86. № 3. P. 370–384.
https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Wan Z. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 36–45.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027

Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // Int. J. Remote Sens. 2004. V. 25. № 1. P. 261–274.
https://doi.org/10.1080/0143116031000116417

Warren S.G. Optical properties of snow // Rev. Geophys. 1982. V. 20. № 1. P. 67.
https://doi.org/10.1029/RG020i001p00067

Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2009. V. 64. № 4. P. 335–344.
https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007

Wetzel C., Brümmer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40 // Meteorol. Zeitschrift. 2011. V. 20. № 6. P. 589–600.
https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0295

Xiong Y., Chen F. Correlation analysis between temperatures from Landsat thermal infrared retrievals and synchronous weather observations in Shenzhen, China // Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 2017. V. 7. P. 40–48.
https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.002

Comparison between *In Situ* and Satellite Multiscale Temperature Data for Russian Arctic Cities for Winter Season

M. I. Varentsov[1, 3, 5], M. Yu. Grischenko[2, 4], and P. I. Konstantinov[2, 5]

[1]*Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia*
[2]*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*
[3]*A.M. Obukhov Institute for Atmospheric Physics, Moscow, Russia*
[4]*HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Moscow, Russia*
[5]*RUDN University, Moscow, Russia*

This study compares three approaches for spatially-resolving microclimatic research on the example of Russian Arctic cities in winter conditions: according to the high-resolution thermal images from the Landsat 8 satellite (1); according to low-resolution images of the MODIS imaging system (2) and from direct measurements of the surface air temperature (3). As the latter, observations of automatic weather stations and temperature sensors of the UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) network and Roshydromet weather stations were used. Two methods of the land surface temperature (LST) calculation from the Landsat 8 satellite images were considered: with atmospheric correction based on MODTRAN radiation transfer model and fixed emissivity values for different land cover types, and without atmospheric correction. The study was carried out for the cities of Apatity, Vorkuta, Salekhard, Nadym and Novy Urengoy. We show that the LST values calculated from Landsat 8 images without atmospheric correction agree with MODIS data and observations better than the results, obtained with atmospheric correction. Such result indicates an inaccuracy in setting the surface emissivity. For a number of cases it was shown that the spatial patterns of the LST and air temperature are closely related, and both types of data show the existence of the urban heat island effect with urban-rural temperature difference up to 4°C in the daytime. These results are fundamentally different from the previous results obtained for lower latitudes, which indicates the prospects of using high-resolution satellite temperature data for mapping and further study of the microclimate of Arctic cities in winter conditions.

Keywords: urban climate, urban heat island, Landsat, MODIS, remote sensing, thermal satellite images, atmospheric correction, microclimate, emissivity, Arctic

REFERENCES

Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments // Earth Obs. Syst. X. 2005. V. 5882. P. 58820E. DOI: 10.1117/12.619990

Daly C., Conklin D.R., Unsworth M.H. Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts // Int. J. Climatol. 2010. V. 30. P. 1857–1864. DOI: 10.1002/joc.2007

Gornyj V.I., Shilin B.V., Jasinskij G.I. Teplovaja ajerokosmicheskaja sjemka. Moscow: Nedra, 1993. 128 p. (In Russian).

Grishchenko M.Y., Chernulich K.K. Studying the interrelation of spatial and ground temperature data, case of the Wrangel and Kunashir islands // Geod. Aerophotosurveying. 2019. V. 63. № 5. P. 566–575. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-566-575

Ho H.C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M. A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area // Sci. Total Environ. 2016. V. 544. P. 929–938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.021

Hori M., Aoki T., Tanikawa T., Motoyoshi H., Hachikubo A., Sugiura K., Yasunari T.J., Eide H., Storvold R., Nakajima Y., Takahashi F. In situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8–14 μm atmospheric window // Remote Sens. Environ. 2006. V. 100. № 4. P. 486–502. DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.001

Klimaticheskie harakteristiki uslovij rasprostranenija primesej v atmosfere: spravochnoe posobie / eds. Je. Ju. Bezuglaja, M.E. Berljand. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 328 p.

Konstantinov P.I., Grishchenko M.Y., Varentsov M.I. 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) // Izv. Atmos. Ocean Phys. 2015. V. 51. № 9. P. 992–998. DOI: 10.1134/S000143381509011X

Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. № 7. P. 75007. DOI: 10.1088/1748-9326/aacb84

Kriksunov L.Z. Spravochnik po osnovam infrakrasnoj tehniki. Moscow: Sovetskoe radio, 1978. 400 p. (In Russian).

Landsberg G.E. Klimat goroda. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 246 p.

Malevich S.B., Klink K. Relationships between snow and the wintertime Minneapolis urban heat island // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2011. V. 50. № 9. P. 1884–1894. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-05.1.

Mathew A., Khandelwal S., Kaul N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities // Energy Build. 2018. V. 159. P. 271–295. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.062

Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 989. DOI: 10.3390/rs9100989

Mironova V., Shartova N., Beljaev A., Varentsov M., Grishchenko M. Effects of Climate Change and Heterogeneity of Local Climates on the Development of Malaria Parasite (Plasmodium vivax) in Moscow Megacity Region // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. V. 16. № 5. P. 694. DOI: 10.3390/ijerph16050694

Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. V. 11. № 8. P. 1380–1384. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2293540

Ojeh V., Balogun A., Okhimamhe A. Urban-Rural Temperature Differences in Lagos // Climate. 2016. V. 4. № 2. P. 29. DOI: 10.3390/cli4020029

Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p. DOI: 10.1017/9781139016476

Rosas J., Houborg R., McCabe M.F. Sensitivity of Landsat 8 surface temperature estimates to atmospheric profile data: A study using MODTRAN in dryland irrigated systems // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 1–27. DOI: 10.3390/rs9100988

Rouse W.R. Microclimate at Arctic Tree Line 1. Radiation Balance of Tundra and Forest // Water Resour. Res. 1984. V. 20. № 1. P. 57–66. DOI: 10.1029/WR020i001p00057

Shahraiyni H.T., Sodoudi S. High-Resolution Air Temperature Mapping in Urban Areas // 2017. V. 21. № 6A. P. 2267–2286. DOI: 10.2298/TSCI150922094T

Shandas V., Voelkel J., Williams J., Hoffman J. Integrating satellite and ground measurements for predicting locations of extreme urban heat // Climate. 2019. V. 7. № 1. P. 5. DOI: 10.3390/cli7010005

Sheng L., Tang X., You H., Gu Q., Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China // Ecol. Indic. 2017. V. 72. P. 738–746. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.009

Sun H., Chen Y., Zhan W. Comparing surface- and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data // Int. J. Remote Sens. 2015. V. 36. № 21. P. 5448–5465. DOI: 10.1080/01431161.2015.1101504

Stankevich S.A., Filippovich V.E., Lubskij N.S., Krylova A.B., Kricuk S.G., Brovkina O.V. Interkalibracija metodov vosstanovlenija termodinamicheskoj temperatury poverhnosti urbanizirovannoj territorii po materialam teplovoj kosmicheskoj sjomki // Ukrainskij zhurnal distancionnogo zondirovanija Zemli. 2015. V. 7. P. 12–21 (In Russian).

Svensson M.K., Eliasson I. Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning // Landscape and Urban Planning. 2002. V. 61. № 1. P. 37–54. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00076-2

Trinh L.H., Terehin Je.A., Vu D.T. Application of remote sensing in determining land surface emissivity using LANDSAT multispectral imagery (case study: Bac Binh district, Binh Thuan province, Vietnam) (in Russian)// Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 6. P. 59–68.

Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A. Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. № 4. P. 329–337 (In Russian).

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. № 23. P. 17573–17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018

Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H. Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geogr. Environ. Sustain. 2019. V. 12. № 4. P. 74–95. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-10

Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sens. Environ. 2003. V. 86. № 3. P. 370–384. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Wan Z. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 36–45. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.027

Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // Int. J. Remote Sens. 2004. V. 25. № 1. P. 261–274. DOI: 10.1080/0143116031000116417

Warren S.G. Optical properties of snow // Rev. Geophys. 1982. V. 20. № 1. P. 67. DOI: 10.1029/RG020i001p00067

Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2009. V. 64. № 4. P. 335–344. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.

Wetzel C., Brümmer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40 // Meteorol. Zeitschrift. 2011. V. 20. № 6. P. 589–600. DOI: 10.1127/0941-2948/2011/0295

Xiong Y., Chen F. Correlation analysis between temperatures from Landsat thermal infrared retrievals and synchronous weather observations in Shenzhen, China // Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 2017. V. 7. P. 40–48. DOI: 10.1016/j.rsase.2017.06.002