Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева)

В.И. Горный[1], С.Г. Крицук[1], И.Ш. Латыпов[1], А.А. Тронин[1], А.В. Киселев[1], О.В. Бровкина[2], В.Е. Филиппович[3], С.А. Станкевич[3], Н.С. Лубский[3]

[1]Санкт-Петербургский НИЦ экологической безопасности РАН
Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru
[2]Global Change Research Institute (CzechGlobe), Brno, 60300, Czech Republic
E-mail: olgabrovkina@mail.ru
[3]Научный центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук НАН Украины, Киев, 01601, Украина
E-mail: casre@casre.kiev.ua

Работа посвящена изучению закономерностей распределения теплофизических характеристик поверхности городской среды, определяющих ее реакцию на потепление климата. В качестве объектов исследования выбраны Санкт-Петербург и Киев − два города-миллионника, отличающиеся как по структуре городской среды, так и по физико-географическим условиям. В качестве информационной основы исследования подготовлены детальные карты радиационных и теплофизических характеристик поверхности городской среды, построенные по результатам многозональных и инфракрасных тепловых многоразовых съемок системами дистанционного зондирования спутников Terra/Aqua(MODIS) и Landsat 8. Для повышения детальности информационной основы до 90 м использован регрессионный подход. Для обоих городов выявлена специфичность теплофизических характеристик большинства функциональных зон, являющаяся фундаментальной основой как для разработки методики спутникового мониторинга состояния функциональных зон селитебных территорий, так и для анализа угрозы перегрева поверхности городской среды при потеплении климата. Показано, что в силу специфичности теплофизических свойств поверхности городской среды на территориях производственных зон и центральных районов городов следует ожидать наиболее интенсивной реакции на потепление климата. Отмечено, что подготовленные карты теплофизических характеристик поверхности городов могут быть использованы для прогнозирования реакции городской среды на изменение климата.

Ключевые слова: город, спутник, дистанционное зондирование, картирование, теплофизические характеристики, специфичность, потепление климата, тепловая реакция, угроза перегрева

Одобрена к печати: 27.02.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66

Введение

Формирование над крупными городами так называемых «тепловых островов», проявляющихся в повышении температуры поверхности городской среды (ПГС) (Price, 1979), негативно сказывается на уровне экологической безопасности населения, в частности, из-за расширения зон перегрева (Инструкция…, 2008). Особенно опасны зоны перегрева ПГС на территориях лечебных учреждений, школ, детских дошкольных учреждений, спортивных площадок, мест отдыха, в пределах которых с мая по сентябрь в 3 часа дня не допускается превышение +23 °С результирующей температуры[1] в течение одного наиболее жаркого месяца (Инструкция…, 2008).

Основными факторами образования «тепловых островов» являются: расходование техногенной энергии; рост концентраций оптически активных газов, отработанных

[1] Результирующая температура − комплексный показатель теплового ощущения человека, объединяющий в единой числовой величине температуру, влажность, движение воздуха и лучистую теплоту (радиационную температуру). Определяется по специальной температурной шкале. Так, при температуре воздуха +25 °С, абсолютной влажности, равной 15 мм. рт. ст., скорости ветра 0,5 м/с и средней радиационной температуре +15 °С результирующая температура будет равна +19,5 °С.

автомобильными двигателями и промышленными предприятиями; «запечатывание» почвы дорожным покрытием; снижение испарения из-за сокращения площади зеленых зон. В последние десятилетия к этим факторам добавилось и глобальное потепление (Доклад Конференции…, 2012; Второй оценочный…, 2014).

Ранее по материалам многолетних тепловых космических съемок нами выполнен прогноз ожидаемых к 2024 г. средних по Санкт-Петербургу и Киеву температур ПГС (Горный и др., 2016). Показано, что при оптимистическом сценарии (темп глобального потепления будет оставаться на том же уровне, что и в предыдущее десятилетие) средняя по городу температура ПГС во время летнего максимума может повыситься в Санкт-Петербурге и Киеве соответственно до +28,1 °C и +30,6 °C, а при пессимистическом сценарии (потепление будет более интенсивным) – до +33,3 °C и +36,3 °C (Горный и др., 2016).

В связи с продолжающимся глобальным потеплением существует риск расширения зон перегрева ПГС. Для предотвращения угрозы перегрева ПГС целесообразно заблаговременно разработать комплекс мероприятий, направленных на минимизацию риска расширения зон перегрева. Для разработки мер по управлению риском перегрева ПГС необходимо выполнить прогноз площади зон перегрева ПГС при различных сценариях изменения климата. Для этого требуется не только прогнозируемый уровень повышения температуры ПГС и воздуха, полученные нами в рамках предыдущих исследований (Горный и др., 2016), но и знание пространственного распределения теплофизических свойств ПГС, определяющих реакцию городской среды на потепление.

При заданных метеорологических условиях температура ПГС определяется следующими ее теплофизическими и радиационными характеристиками: $p = (\lambda c \rho)^{1/2}$ – тепловая инерция, *Дж* / (м^2 $c^{1/2}$ *К*); A – альбедо поверхности, *доли единицы*; ε – коэффициент излучения, *доли единицы*; s – доли среднесуточной скорости испарения от испаряемости с открытой водной поверхности, *доли единицы* (Горный и др., 1993; Cracknell, Xue, 1996; Горный, 2004). Поэтому знание пространственного распределения этих величин, а также D – коэффициента турбулентного теплообмена между приземным слоем атмосферы и ПГС, позволяет моделировать суточный ход температуры земной поверхности для любых заданных метеоусловий, в том числе и для ожидаемых к 2024 г. в результате повышения температур приземного слоя воздуха. Картирование теплофизических свойств и радиационных характеристик ПГС позволит выполнить анализ их статистических распределений в пределах функциональных зон городов. Знание же статистических распределений теплофизических характеристик ПГС будет являться фундаментальной основой для последующего прогнозирования расширения зон перегрева ПГС под влиянием ожидаемого потепления.

В связи с этим целью настоящей работы является картирование и сравнительный анализ статистических распределений теплофизических свойств и радиационных характеристик ПГС функциональных зон городов.

1. Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны Санкт-Петербург и Киев, расположенные в различных физико-географических зонах и отличающиеся по структуре функциональных зон (*рис. 1*), морфологии рельефа поверхности, климату.

Этот выбор позволяет не только вычленить общие закономерности, но и выполнить сравнительный анализ влияния природных условий на теплофизические свойства ПГС.

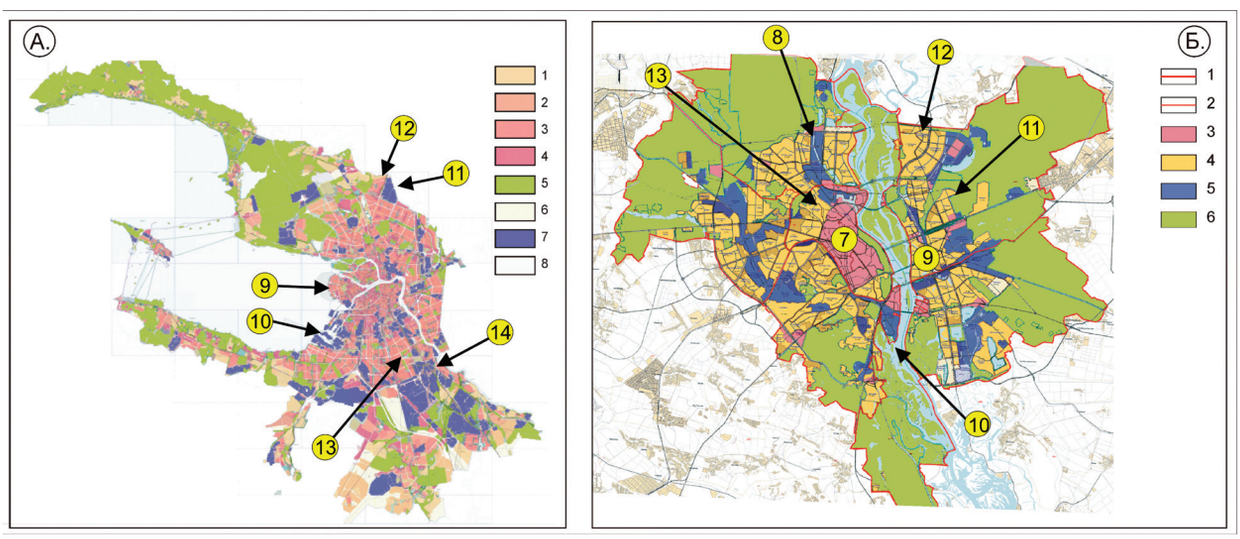

Рис. 1. Упрощенные карты функциональных зон городов:
А. – Санкт-Петербурга (https://gov.spb.ru/law?d&nd=64230002&prevDoc=3): 1. Зона застройки индивидуальными жилыми домами. 2. Зона малоэтажной жилой застройки. 3. Зона среднеэтажной и многоэтажной жилой застройки. 4. Зона всех видов общественно-деловой застройки. 5. Рекреационные зоны. 6. Зона сельскохозяйственных угодий. 7. Производственные зоны и зоны инженерной и транспортной инфраструктуры. 8. Зона объектов водного транспорта.
Б. – Киева (http://kga.gov.ua/generalnij-plan): 1. Граница города. 2. Границы плановых зон. 3. Многофункциональный городской центр. 4. Жилая и общественная застройка. 5. Производственные и складские территории. 6. Ландшафтно-рекреационные зоны

Для картографирования теплофизических свойств ПГС Санкт-Петербурга и Киева использованы полученные в условиях многодневной безоблачной погоды материалы съемки спектрорадиометром низкого геометрического разрешения, установленном на спутниках Terra/Aqua(MODIS), и высокого геометрического разрешения, установленном на спутнике Landsat 8 (*табл. 1*).

По материалам съемки спутниками серии EOS и Landsat восстанавливалась температуры земной поверхности (ТЗП) и коэффициенты излучения. Для проверки качества определения коэффициентов излучения применялись две методики: методика, основанная на зависимости коэффициента излучения от проективного покрытия растительности, и методика с использованием программы MODTRAN (Станкевич и др., 2015).

Карты альбедо земной поверхности и коэффициентов спектральной яркости строились по материалам съемки спутником Landsat 8 по стандартной методике [http://landsat.usgs.gov/landsat8.php].

Таблица 1. Характеристики использованных материалов спутниковых съемок

№ п/п	Спутник (прибор)	Санкт-Петербург		Киев	
		Дата, дд.мм.гггг	Местное время съемки, чч:мм	Дата, дд.мм.гггг	Местное время съемки, чч:мм
1	Terra/Aqua (MODIS)	17.05.2014	11:40	06.09.2014	3.55
2			3:50		11:20
3			11:40		13:25
4			13:15		22:50
5			13:15	07.09.2014	3:00
6			22:55		12:25
7			2:55		14:10
8		18.05.2014	12:20	08.09.2014	23:35
9			14:10		3:40
10			22:00		11:30
11		19.05.2014	3:40		13:15
12			11:25		22:40
13			13:05		2:45
14			22:40	09.09.2014	12:10
15		-	-		13:55
16		-	-		23:20
17		-	-		3:30
18		-	-	10.09.2014	11:15
19		-	-		12:55
20	Landsat 8	17.05.2014	12:10	10.09.2014	11:45

Карты[2] тепловой инерции, доли испаряемости влаги, теплового потока (*рис. 2, 3*) строились путем применения теплоинерционного подхода к результатам многоразовой тепловой и многоспектральной космической съемки (Watson et al., 1971; Price, 1982; Cracknell, Xue, 1996; Горный, 2004).

Для повышения геометрического разрешения итоговых карт теплофизических свойств ПГС использовался подход, основанный на применении регрессионных моделей (Крицук и др., 2016). Эти модели строились на основе комплексирования материалов многоразовой тепловой и многоспектральной космических съемок, выполненных системами низкого (Terra/Aqua(MODIS)) и высокого (Landsat 8) геометрического разрешения. В результате была достигнута детальность в 90 м карт для теплофизических свойств ПГС (Крицук и др., 2016).

На картах функционального зонирования городов (*рис. 1*) были выбраны участки с достаточными для статистической представительности площадями. В пределах каждого участка выполнялся анализ статистических распределений теплофизических свойств ПГС. После чего была выполнена эталонная классификация (Крицук, 2012) с использованием всего набора карт теплофизических и радиационных характеристик ПГС (*рис. 5*).

[2] При определении теплофизических характеристик в алгоритме используется математическая модель суточного хода температуры поверхности, в которую заложены некоторые упрощения (например, предположение о том, что поверхность является поверхностью однородного полупространства). Поэтому картографируемые таким образом характеристики являются кажущимися.

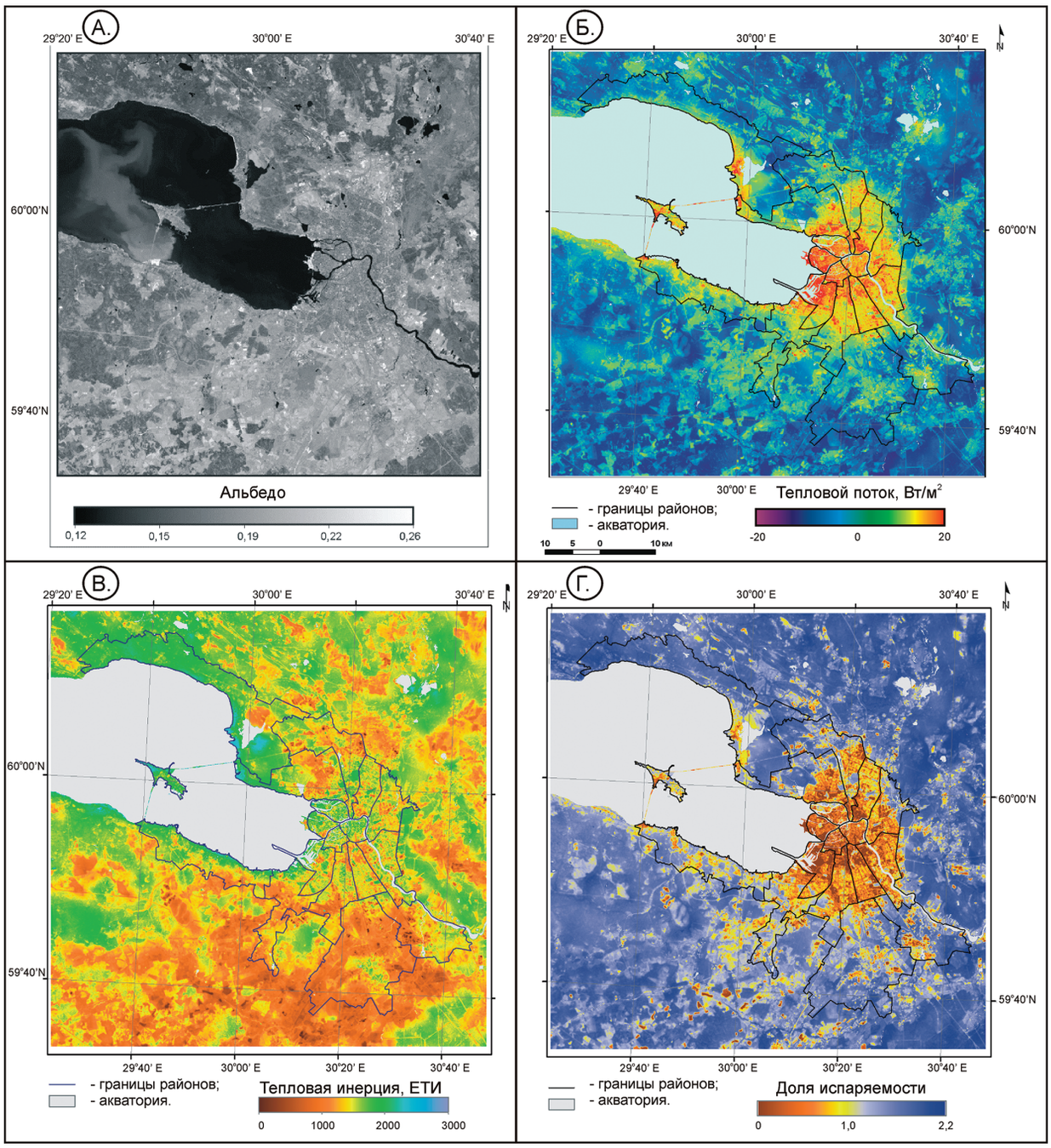

Рис. 2. Карты теплофизических свойств и альбедо ПГС Санкт-Петербурга, построенные по материалам многоразовых космических съемок: А. – альбедо поверхности; Б. – тепловой поток; В. – тепловая инерция; Г. – доля испаряемости

Для наземной заверки результатов спутникового картографирования тепловой инерции в июле–августе 2015 г. выполнены многодневные режимные измерения температуры поверхности крыш у домов новой и старой построек и синхронные наблюдения метеорологических характеристик. Промежуток времени между последовательными измерениями всех характеристик составлял две минуты с осреднением данных на этом промежутке времени. Для этого использовались 10 температурных портативных логгеров (самописцев) DS1922L-F5# (Термохрон) и цифровая метеостанция Transportable Weather Station 110-WS-18-B с пиранометром PMA1141, Class II Pyranometer.

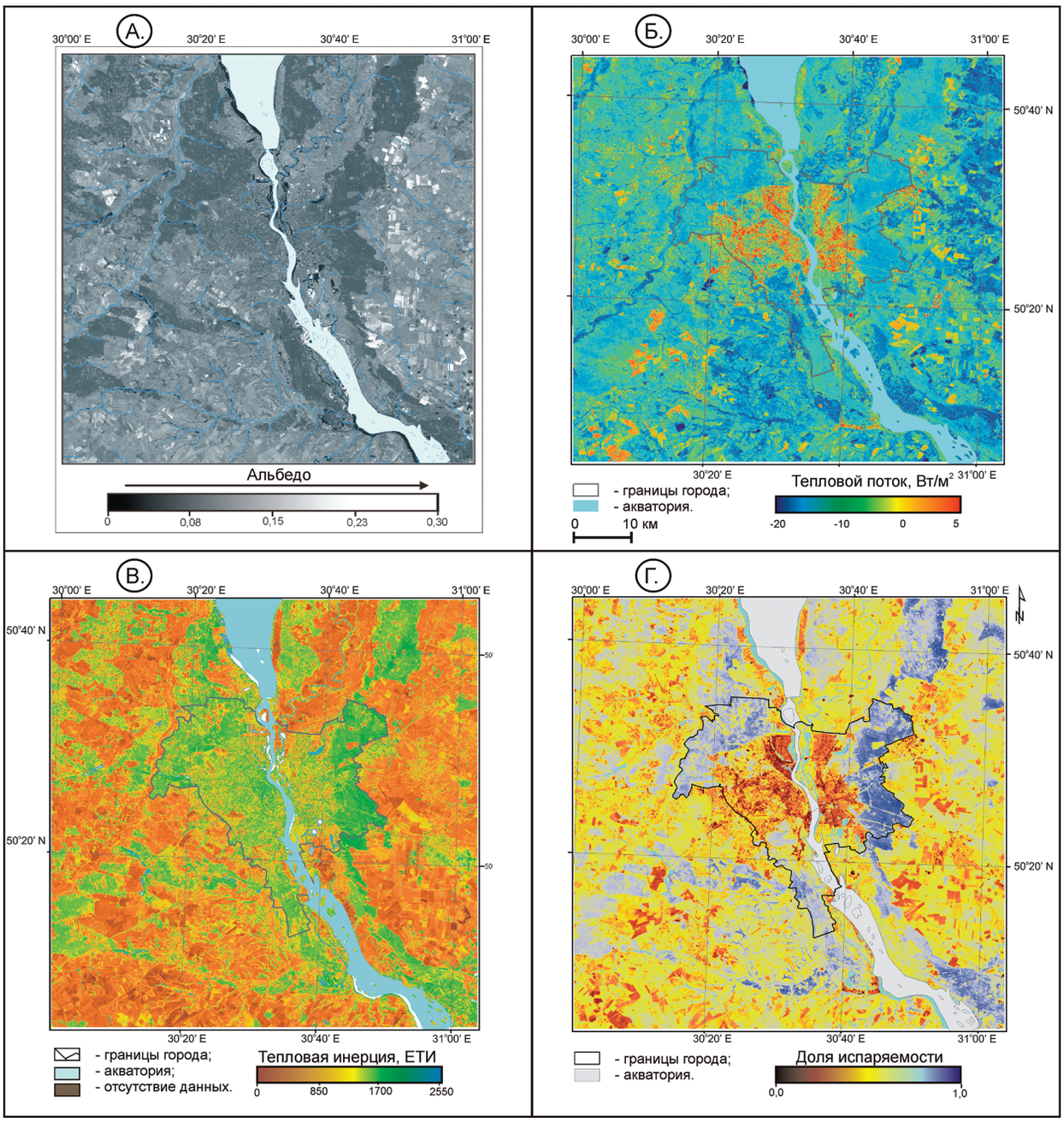

Рис. 3. Карты теплофизических свойств и альбедо ПГС Киева, построенные по материалам многоразовых космических съемок: А. – альбедо поверхности; Б. – тепловой поток; В. – тепловая инерция; Г. – доля испаряемости

С июня по сентябрь 2016 г. были выполнены автоматические режимные тепловизионные наблюдения температуры поверхности дорожного асфальтового покрытия, также синхронизированные с режимными наблюдениями метеорологических характеристик. Для этого использовался тепловизор Optris PI 160, синхронизированный с фотокамерой. Тепловые изображения регистрировались круглосуточно каждые 2 минуты с осреднением температуры на этом промежутке времени в каждом пикселе теплового изображения.

Определение кажущейся тепловой инерции крыш и дорожного покрытия выполнялось с помощью того же алгоритма (Горный, 2004), что и при обработке спутниковых материалов.

2. Результаты

Полученные статистические распределения теплофизических свойств ПГС представлены на *рис. 2, 3* и в *табл. 2*.

Результаты обработки данных наземных измерений, выполненных для верификации результатов картирования теплофизических свойств ПГС по данным спутниковых съемок, приведены в *табл. 3*.

Таблица 2. Теплофизические характеристики функциональных зон Санкт-Петербурга и Киева по результатам спутниковых съемок

Функциональная зона	***Тепловая инерция, ЕТИ***[3]		***Инкремент теплового потока***[4]***, Вт/м²***		***Доля испаряемости, доли единицы***	
	Среднее значение	***Ср. кв. откл., ±σ***	***Среднее значение***	***Ср. кв. откл., ±σ***	***Среднее значение***	***Ср. кв. откл., ±σ***
Санкт-Петербург						
Рекреационные на окраине	1440	±160	0.0	±2,8	1,03	±0,08
Рекреационные внутренние	1770	±210	10,5	±2,0	0,77	±0,07
Застройки индивидуальными домами (садоводства)	950	±150	6,5	±1,8	0,72	±0,06
Малоэтажной, многоквартирной застройки	1120	±400	9,5	±3,7	0,68	±0,13
Многоэтажной застройки (новостройки)	1130	±320	11,0	±3,8	0,56	±0,13
Среднеэтажной и многоэтажной застройки	1300	±150	17,4	±2,3	0,41	±0,10
Общественно-деловая	1470	±150	21,6	±2,6	0,32	±0,12
Транспортной инфраструктуры	930	±240	13,8	±6,1	0,37	±0,23
Производственная	1240	±140	26,3	±3,9	0,00	+0,18
Киев						
Рекреационная на окраине (широколиственные деревья)	1400	±200	0,0	±0,6	0,82	±0,09
Сельскохозяйственного назначения	1020	±320	1,0	±1,0	0,67	±0,14
Малоэтажной, многоквартирной застройки	1260	±200	4,6	±0,9	0,54	±0.10
Среднеэтажной и многоэтажной застройки	1310	±220	5,8	±0,9	0,5	±0,12
Многоэтажной застройки (новостройки)	1370	±280	8,0	±1,1	0,4	±0,1
Общественно-деловая (высотная)	1470	±280	6,1	±1,2	0,46	±0,15
Производственная	1350	±290	8,2	±0,14	0,37	±0,16

[3] ЕТИ – единица тепловой инерции, Дж /(м^{2}с$^{1/2}$К)

[4] Под инкрементом теплового потока здесь понимается приращение теплового потока в данной функциональной зоне по отношению к пригородной зоне, отражающее в основном потери антропогенной энергии.

Таблица 3. Кажущаяся тепловая инерция ПГС Санкт-Петербурга по данным наземных режимных измерений

Тип ПГС	***Тепловая инерция, ЕТИ***	***Альбедо***
Крыша железная, окрашенная. Дом старой постройки, Петроградский район	80	0,13
Крыша панельного дома новой постройки, Купчино	940	0,14
Дорожное покрытие старое (асфальт), Петроградский район	1200 ±100	0,19

3. Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов позволяет отметить значительное отличие характеристик ПГС центральных районов Санкт-Петербурга от окружающих их территорий. Оказалось, что по результатам восстановления коэффициента излучения ПГС центра с использованием программы MODTRAN (Станкевич и др., 2015) центр Санкт-Петербурга характеризуется минимальными значениями коэффициента излучения $\varepsilon = 0{,}96$ и ниже, также как и минимумом доли испаряемости. Минимальные значения коэффициента излучения центральных районов объясняются большой долей железных крыш. Например, неокрашенное кровельное железо может иметь коэффициент излучения $\varepsilon = 0{,}77$, масляные краски, которыми красят железные крыши, – $\varepsilon = 0{,}885$, полированный алюминий, употребляющийся при строительстве современных жилых и производственных зданий, − $\varepsilon = 0{,}039$ (Крейт, Блэк, 1983). В то же время для других типов ПГС значения коэффициентов излучения изменяются в пределах $\varepsilon = 0{,}937 \div 0{,}987$ (Станкевич и др., 2015).

Анализ статистических распределений теплофизических свойств ПГС Санкт-Петербурга и Киева показывает достаточно закономерное их изменение. Так, с уменьшением площади зеленых зон последовательно снижаются значения доли испаряемости (*табл. 2* и *рис. 4*). Наибольшими значениями доли испаряемости обладают лесопарковые зоны на окраинах городов. Высокая доля испаряемости древесной растительности объясняется большой суммарной площадью листьев, значительно превышающей площадь территории, на которой она произрастает.

Низкая доля испаряемости в центральных районах Санкт-Петербурга (4, 9 на *рис. 1а*) и Киева (3 на *рис. 1б*) объясняется малой долей зеленых зон и «запечатанностью» почвы асфальтом.

Особенно низкой долей испаряемости характеризуются производственные зоны Санкт-Петербурга (7 на *рис. 1*) и Киева (5 на *рис. 1*), в пределах которых площадь растительности минимальна (*рис. 2, 3*, *табл. 2*). Кроме того, в этих зонах наблюдаются высокие значения инкремента теплового потока (*рис. 2−4*). Максимум инкремента теплового потока может быть объяснен как интенсивным расходом техногенной энергии, так и минимальным испарением с ПГС при практически полном отсутствии растительности и открытой

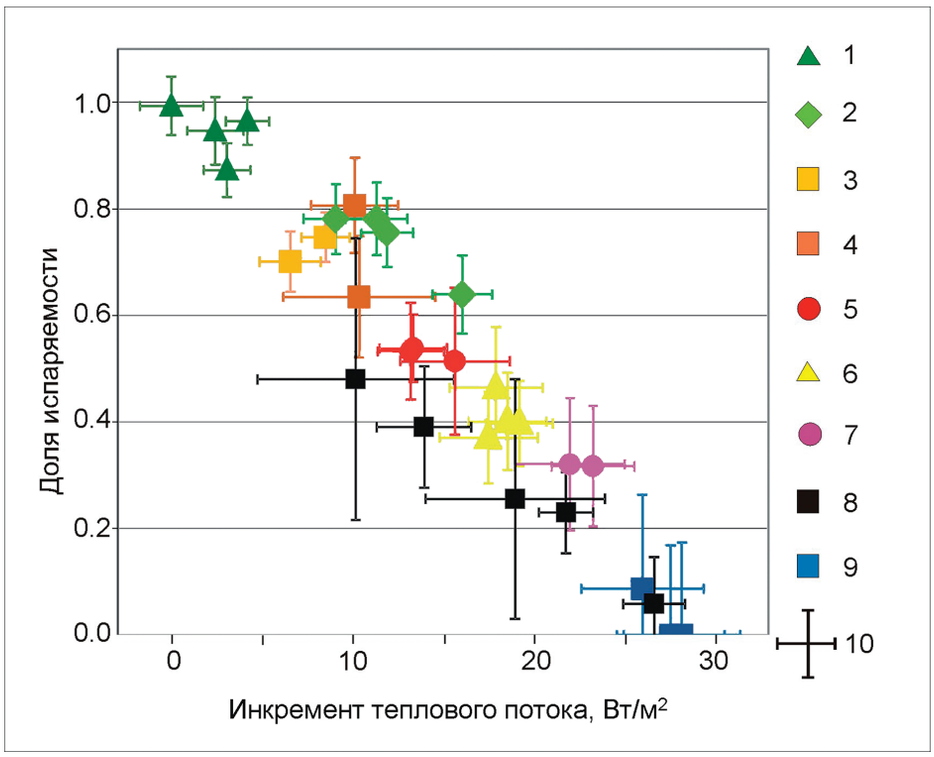

Рис. 4. Распределение теплофизических свойств ПГС Санкт-Петербурга. Зоны застройки: 1. Рекреационные на окраине города (лесопарки: Ржевский, Юнтоловский, Баболовский-Александровский, Сосновая поляна). 2. Рекреационные внутренние (Александровский парк, Летний сад, Сосновка, Удельный парк). 3. Индивидуальными домами (садоводства: Александровское, Мертуть, Разлив). 4. Малоэтажной, многоквартирной (Зеленогорск, Кронштадт, Петродворец). 5. Многоэтажной – новостройки (Мурино, Новая Охта, Новое Девяткино, Кудрово, Предпортовая, Северная долина, Шушары). 6. Среднеэтажной и многоэтажной (Гражданка, Комендантский, Колпино, Купчино, Ржевка). 7. Общественно- деловой (Адмиралтейский, Петроградский районы). 8. Транспортной инфраструктуры (Аэропорт Пулково, Московская и Финляндская сортировочные). 9. Производственной (Адмиралтейские верфи, Балтийский и Металлический заводы). 10. Доверительные интервалы ±σ – среднеквадратичное отклонение

почвы. В результате осадки не испаряются с ПГС, а быстро скатываются в ливневую канализацию и не приводят к охлаждению ПГС, что может проявляться в повышении кажущегося теплового потока.

Тепловая инерция ПГС в целом достаточно высока из-за высокой тепловой инерции большинства конструкционных материалов (Горный и др., 1993) и дорожных покрытий (*табл. 3*), формирующих ПГС. Высокой же тепловой инерцией характеризуются и лесопарковые зоны. Это следствие эффективного турбулентного теплообмена поверхности лесных экосистем с приземным слоем воздуха из-за большой площади поверхности листьев. Как правило, амплитуда суточных колебаний температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью меньше, чем у большинства ПГС. Поэтому, чем эффективнее теплообмен приземного слоя воздуха с ПГС, тем меньше амплитуда суточных колебаний температуры этой поверхности, и, соответственно, тем выше кажущаяся тепловая инерция исследуемой ПГС.

В Санкт-Петербурге аномально низкие значения тепловой инерции наблюдаются на тех участках производственных зон, которые застроены зданиями и сооружениями с металлическими крышами и металлическими ангарами. По этому признаку хорошо выделяется как территория первого промышленного пояса Санкт-Петербурга (см. 10 на *рис. 1*

и *рис. 2в*), застроенного кирпичными зданиями с металлическими крышами, так и новый производственный кластер «Парнас» (см. 11 на *рис. 1а* и *рис. 2б*), расположенный на самом северо-востоке Санкт-Петербурга и граничащий с новостройками (см. 12 на *рис. 1а* и *рис. 2б*). Аналогичная ситуация наблюдается и в старых спальных районах Санкт-Петербурга. Характерным примером является район более озелененного и менее высокоэтажного Купчино (см. 13 *на рис. 1а* и *рис. 2б*), рядом с которым в последние годы возник складской кластер − крупные сооружения, покрытые металлическими листами (см. 14 на *рис. 5а* и *рис. 2б*).

Как показали наземные измерения (*табл. 3*), кажущаяся тепловая инерция металлических крыш чрезвычайно низка. Поэтому результирующая кажущаяся тепловая инерция, определяемая по материалам спутниковых съемок в производственных зонах, застроенных металлическими ангарами, определяется долей территории, застроенной этими сооружениями. Чем выше проективное покрытие металлических сооружений, тем ниже кажущаяся тепловая инерция. Возможно, что значимую роль в понижении тепловой инерции промышленных зон играет и слой пыли на их поверхности. Известно, что мелкодисперсные, воздушно-насыщенные вещества характеризуются низкой тепловой инерцией (Горный и др., 1993).

В Киеве в пределах производственных зон наблюдается аналогичное Санкт-Петербургу распределение теплофизических характеристик ПГС. В первую очередь это относится к крупным промышленным узлам: Подольско-Куреневскому (см. 8 на *рис. 1б* и *рис. 3в*), который практически полностью лишен растительного покрова из-за высокой плотности крупных промышленных построек и гаражных кооперативов, а также к Днепровскому (см. 9 на *рис. 1б* и *рис. 3в*), на территории которого помимо промышленных комплексов располагается Дарницкая ТЭЦ и обширная сеть железнодорожных путей сортировочной станции. Аналогичная ситуация наблюдается и в полосе вдоль правого берега Днепра в районах Телички и Корчеватого (см. 10 на *рис. 1б* и *рис. 3в*). Эта территория является сплошной промзоной, занятой ТЭЦ-5 и промышленными предприятиями самого разного профиля.

Таким образом, как в Санкт-Петербурге, так и в Киеве ПГС промышленных зон характеризуется наиболее высокими значениями инкремента теплового потока, низкими тепловой инерцией и долей испаряемости.

В соответствии с теоретическими представлениями (Горный и др., 1993), отсутствие испарения и низкая тепловая инерция приводят к быстрому нагреву ПГС днем и поэтому являются основными факторами риска перегрева ПГС производственных зон.

ПГС общественно-деловых центров Санкт-Петербурга и Киева характеризуется высокими значениями инкремента теплового потока, низкой долей испаряемости и высокими значениями тепловой инерции. Высокие значения инкремента теплового потока объясняются высокой плотностью застройки и, как следствие, − высоким удельным расходованием техногенной энергии. Кроме того, определенную роль может играть высокая плотность населения центральных районов городов (особенно во время рабочего дня). В результате

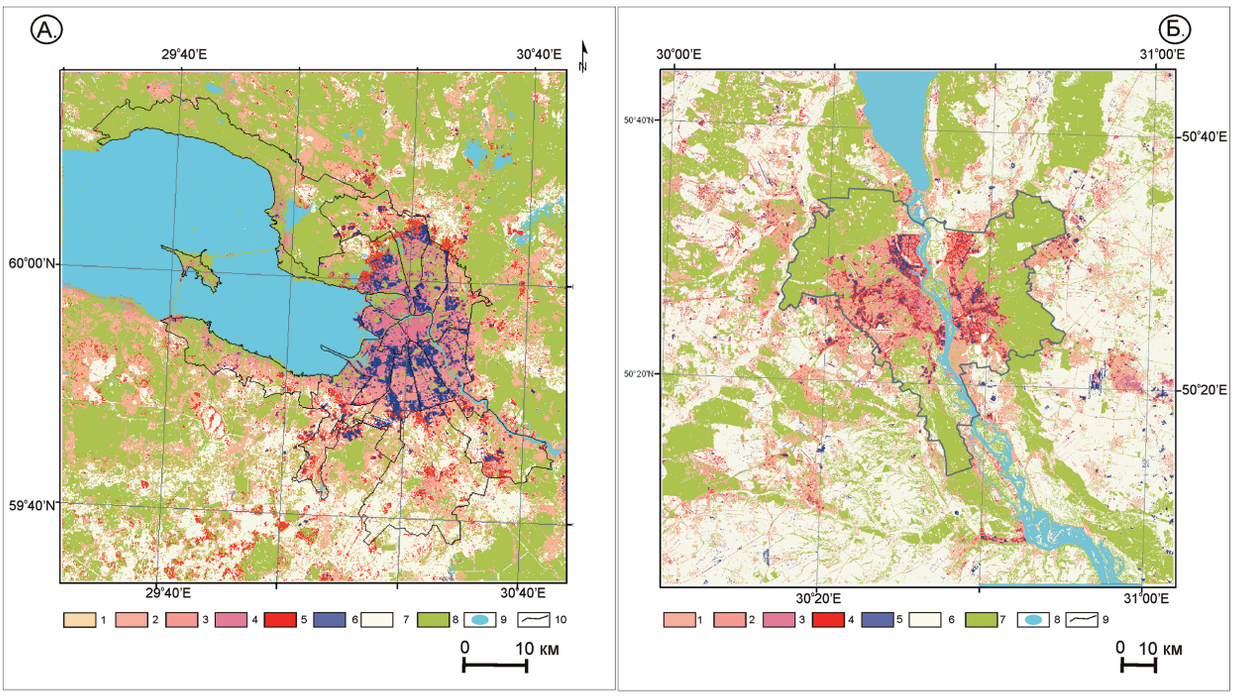

Рис. 5. Районирование территории по теплофизическим характеристикам ПГС, построенные на основе эталонной классификации:
А. – Санкт-Петербург: 1. Зона застройки индивидуальными жилыми домами. 2. Зона малоэтажной многоквартирной жилой застройки. 3. Зона среднеэтажной и многоэтажной жилой застройки. 4. Зона всех видов общественно-деловой застройки. 5. Новостройки. 6. Производственные зоны и зоны инженерной и транспортной инфраструктуры. 7. Зоны сельскохозяйственных угодий. 8. Рекреационные зоны. 9. Акватории. 10. Границы районов.
Б. – Киев: 1. Зона малоэтажной жилой застройки. 2. Зона среднеэтажной и многоэтажной жилой застройки. 3. Зона всех видов общественно-деловой застройки. 4. Новостройки. 5. Производственная зона и зона инженерной и транспортной инфраструктуры. 6. Зонам сельскохозяйственных угодий. 7. Лесо-парковая зона. 8. Акватории. 9. Границы города

в центральных районах расходуется большее количество энергии на бытовые нужды. Кроме того, большей плотности населения соответствует более высокая потеря энергии человеческими телами на обогрев окружающей среды. Известно, что тепловыделение тела человека в окружающую среду в зависимости от интенсивности физической работы составляет от 80 до 300 Вт (Богословский, 1982). Предположим, что при норме размещения 20 м^2 на человека теплопотери в окружающую среду в многоэтажном здании происходят с боковой стены площадью 10 м^2. В этом случае плотность потока тепла с боковой стены за счет тепловыделения людей составит от 8 до 30 Вт/м^2. Сопоставление этой приблизительной оценки с результатами наших определений (*табл. 2*) показывает тот же порядок величин. Статистическая же связь между плотностью населения и температурой ПГС изучена китайскими специалистами. Ими показано, что наблюдается корреляция между плотностью населения городов и температурой ПГС (Huang et al., 2015), что не противоречит нашим оценкам.

Вторым характерным свойством общественно-деловых центров обоих городов является низкая доля испаряемости с ПГС. Этот факт, с очевидностью, определяется подавляющей долей ПГС, покрытой асфальтом, керамической плиткой, и малой долей участков с открытой почвой и растительным покровом. При этом как в Санкт-Петербурге, так и

в Киеве в значительной степени ситуация усугубляется тем, что существенную долю территории центральных районов занимают железнодорожные вокзалы со связанной с ними инфраструктурой (автостоянки, железнодорожные депо, сортировочные станции, вагоноремонтные мастерские) и другие транспортно-производственные объекты.

Третьим свойством общественно-деловых центров обоих городов являются достаточно высокие значения тепловой инерции. Несмотря на чрезвычайно низкие значения кажущейся тепловой инерции металлических крыш в домах старой застройки (*табл. 3*), интегральные по площади значения тепловой инерции превышают 1000 ЕТИ. Это результат того, что доля площади дорог и тротуаров с асфальтовым и плиточным покрытием значительно превышает долю площади крыш. Кроме того, при выполнении космической тепловой съемки городов визирование чаще всего производится не в надир. Поэтому в мгновенное поле зрение сканера кроме крыш и дорог попадают и стены домов, характеризующиеся высокой тепловой инерцией.

В пределах селитебных ландшафтно-функциональных зон Киева прослеживается характерное отличие между жилыми массивами, которые развивались во второй половине 20-го века, и теми, которые формировались в последние десятилетия. Для более старых районов (Виноградарь, Лесной массив (см. 11 на *рис. 1б* и *рис. 3б, в*), Старая Дарница, Отрадный, Борщаговка и т. д.) характерны сравнительно низкий инкремент теплового потока и более высокая доля испарения. Это обусловлено обилием газонов и деревьев во дворах придомовых территорий. В более новых районах (Оболонь, Троещина (см. 12 на *рис. 1б* и *рис. 3б, в*), Харьковский массив) ситуация обратная, так как к факторам, влияющим на микроклимат, помимо низкой плотности зеленых зон добавляется высокая этажность застройки (*рис. 3б* и *3г*).

Отличием городской среды Киева от таковой у Санкт-Петербурга является наличие в Киеве выраженного рельефа дневной поверхности с перепадом высот до 50–70 м. Зоны со значительными перепадами рельефа (правобережный склон Днепра, район Татарка, склон между центром города и Подолом, Замковая гора (см. 13 на *рис. 1б* и *рис. 3б, г*)) характеризуются низкими значениями инкремента теплового потока и высокой долей испаряемости. Этот факт легко объясняется практически отсутствием застройки склонов и в связи с этим обилием древесной растительности и накоплением влаги в низинах. Анализ показал, что рельеф в Киеве мало влияет на результаты спутникового картирования теплофизических свойств ПГС. Основными факторами, влияющими на теплофизические свойства ПГС, являются плотность застройки и распространение растительности, на втором месте – материал покрытия поверхностей города.

Отличием между теплофизическими характеристиками ПГС Санкт-Петербурга и Киева являются существенно большие значения инкремента теплового потока в Санкт-Петербурге (см. *рис. 2б, 3б*, *табл. 2*). Это, скорее всего, является результатом более интенсивного расходования в Санкт-Петербурге техногенной энергии.

Необходимо отметить и различную ландшафтную обстановку, на фоне которой находятся Санкт-Петербург и Киев. Санкт-Петербург окружен в основном лесными массивами

с высокими значениями тепловой инерции и доли испаряемости. Киев же окружен обширными площадями сельскохозяйственных угодий с низкими значениями тепловой инерции и незначительной долей скорости испарения. Такое сочетание теплофизических свойств объясняется наличием высохшей корки на открытой поверхности почвы. Это отличие хорошо просматривается при сравнении карт тепловой инерции (*рис. 2в* и *рис. 3в*) и доли испаряемости (*рис. 2г* и *рис. 3г*)

Полученные статистические распределения показывают, что в Санкт-Петербурге и Киеве наблюдается специфика теплофизических свойств у различных типов городской застройки. Исключением являются зоны транспортной инфраструктуры (7 на *рис. 1а*), характеризующиеся значительным разбросом значений теплофизических характеристик. Это вызвано объединением в один таксон, например, таких разнородных объектов как железнодорожные депо и сортировочные станции, застроенные сооружениями из кирпича, бетона и стали, и которые больше напоминают производственные зоны, с зоной отчуждения аэропорта «Пулково», в которую включены территории с луговой и кустарниковой растительностью, близкой к пригородным территориям. Тем не менее для большинства типов ПГС специфичность наборов теплофизических свойств соблюдается (*рис. 2, 3, 4*, *табл. 2*). Этот факт может быть использован как при обновлении карт функциональных зон городов на основе спутникового мониторинга ПГС с последующим районированием территорий городов на основе эталонной классификации комплекса теплофизических характеристик (см. *рис. 1* и *5*), так и при оценке риска перегрева ПГС различных функциональных зон в условиях прогнозируемого к 2024 г. потепления.

Совместный анализ карт районирования (*рис. 5*) и статистических распределений теплофизических характеристик ПГС (*рис. 4* и *табл. 2*) показывает, что карты районирования территории по наборам теплофизических характеристик (*рис. 5*) могут рассматриваться как карты угрозы перегрева ПГС, где угроза приведена в качественном виде (в категориях «больше−меньше»). Под угрозой обычно понимается «совокупность условий и факторов, создающих опасность» (Гацко, 2001). Существенным моментом для угрозы является также возможность создания опасной ситуации. В нашем случае определенный набор теплофизических характеристик ПГС определяет потенциальную возможность перегрева ПГС. Поэтому подобный набор может рассматриваться как фактор, создающий опасность. А прогнозируемое к 2024 г. в Санкт-Петербурге и Киеве потепление (Горный и др., 2016) указывает на возможность создания опасной ситуации. Представляется, что дальнейшим развитием этого направления может быть карта риска перегрева ПГС, представленного в количественном виде в форме вероятности образования зоны перегрева ПГС.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Большинство функциональных зон Санкт-Петербурга и Киева характеризуются специфическими наборами теплофизических характеристик ПГС. Специфичность теплофизических характеристик ПГС позволяет использовать их для картирования функциональных зон больших городов.

2. Следует ожидать, что наиболее интенсивная реакция ПГС на потепление климата должна происходить на территориях производственных зон и центральных районов городов.

3. Построенные по материалам спутниковых съемок карты теплофизических характеристик ПГС могут рассматриваться в качестве фундаментальной основы для прогнозирования реакции ПГС Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 14-05-90416 и НАН Украины грант № 10-05-14 (У) «Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок)».

Литература

1. *Богословский В.Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. Школа, 1982. 415 с.
2. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 61 с. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_teh.pdf.
3. *Гацко М.Ф.* Сущность понятий «угроза» и «опасность» и их соотношение в военно-политической сфере // Материалы научно-практической конференции 15−16 февраля 2001 года «Проблемы внутренней безопасности России в XXI веке». Москва. 2001. С. 54−55.
4. *Горный В.И.* Космические измерительные методы инфра-красного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 10–16.
5. *Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И.* Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
6. *Горный В.И., Лялько В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Бровкина О.В., Киселев А.В., Давидан Т.А., Лубский Н.С., Крылова А.Б.* Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.
7. Доклад Конференции Сторон о работе ее семнадцатой сессии, состоявшейся в Дурбане с 28 ноября по 11 декабря 2011 года // Рамочная Конвенция об изменении климата. Организация Объединенных Наций. 2012. 106 с. URL: http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf.
8. Инструкция по проведению инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации строительства, реконструкции объектов в г. Москве. МОСКОМАРХИТЕКТУРА. Москва. 2008. 204 с. URL: http://www.complexdoc.ru/ntdtext/537016.
9. *Крейт Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи. М.: «Мир». 1983. 512 с.
10. *Крицук С.Г., Горный В.И., Латыпов И.Ш.* Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.
11. *Крицук С.Г.* Картирование бореальных лесов на основе спутниковых данных (на примере ООПТ Ленинградской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 255−265.
12. *Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В., Горный В.И., Тронин А.А.* Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки // Український журнал дистанційного зондування Землі. 2015. № 7. С. 14–23.
13. *Cracknell A.P., Xue Y.* Thermal inertia de-termination from space − a tutorial review // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17. No. 3. P. 431−461.
14. *Huang Q., Lu Y., Ulhoi J.* The Effect of Urban Heat Island on Climate Warming in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2015. No. 12 (8): P. 8773–8789. URL: http://www.mdpi.com/1660-4601/12/8/8773/htm (актуально в 2017).
15. *Price J.C.* Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data // Monthly Weather Review. 1979. Vol. 107. No. 11. P. 1554–1557.
16. *Price J.C.* On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales // Journal of Applied Meteorology. 1982. Vol. 21. P. 1111−1122.
17. *Watson K., Rowan L.C., Offield T.V.* Application of Thermal Modeling in Geologic Interpretation of IR Images // Proceedings of 7-th International Symposium on Remote Sensing of Environmen. Ann Arbor, Michigan. 1971. P. 2017−2041.

Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev)

V.I. Gornyy[1], S.G. Kritsuk[1], I.Sh. Latypov[1], A.A. Tronin[1], A.V. Kiselev[1], O.V. Brovkina[2], V.E. Filippovich[3], S.A. Stankevich[3], N.S. Lubskii[3]

[1]SRCES RAS, St. Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru
[2]Global Change Research Institute (CzechGlobe), Brno 60300, Czech Republic
E-mail: olgabrovkina@mail.ru
[3]Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth NAS of Ukraine
Kiev 01601, Ukraine
E-mail: casre@casre.kiev.ua

Thermophysical properties of land surface of urban areas determine the response to the continuous climate change. St. Petersburg and Kiev, two big cities with over a million of population were chosen to be objects of the study. These cities are differently structured and located in the different climate zones. The maps of thermophysical properties of land surface were compiled basing on the results of multispectral and infrared-thermal surveys carried out by remote sensing satellites Terra/Aqua (MODIS instrument) and Landsat 8. The regression approach was used to improve the spatial resolution of maps up to 90 m. It was found that particular functional zones of the city have specific thermophysical properties. That specificity is considered to be a fundamental basis to the remote monitoring of the situation at the various functional zones of residential areas as well as for the analysis of the overheating danger in the urban environment under the global warming impact. Thermophysical properties of the land surface in industrial zones and civic centres determine the increased response to a climate warming. The compiled maps of thermophysical properties can be used to predict the urbanized environment response to the climate change.

Keywords: urban area, satellite, remote sensing, mapping, thermophysical properties, specificity, Global warming, thermal response, the threat of overheating

Accepted: 27.02.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66

References

1. Bogoslovskii V.N., *Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha)* (Heat transfer for building (thermal heating foundations, ventilation and air conditioning)), Moscow: Vysshaya Shkola, 1982, 415 p.
2. http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_teh.pdf
3. Gatsko M.F., Sushchnost' ponyatii "ugroza" i "opasnost'" i ikh sootnoshenie v voenno-politicheskoi sfere (The essence of the concepts of "threat" and "danger" and their relationship to the military-political sphere), *Materialy Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii 15−16 fevralya 2001 goda "Problemy Vnutrennei Bezopasnosti Rossii v XXI veke"* (Proceedings of the conference on February 15−16, 2001 "Problems of Russian internal security in the XXI century"), Moscow: 2001, pp. 54−55.
4. Gornyy V.I., Kosmicheskie izmeritel'nye metody infra-krasnogo teplovogo diapazona pri monitoringe potentsial'-no opasnykh yavlenii i ob"ektov (Satellite infrared measurement techniques for monitoring potentially dangerous phenomena and objects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Issue 1, pp. 10–16.
5. Gornyy V.I., Shilin B.V., Yasinskii G.I., *Teplovaya aerokosmicheskaya s"emka* (Ifrared thermal airborne and satellite flown imagery), Moscow: Nedra, 1993, 128 p.
6. Gornyy V.I., Lyal'ko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A, Lubskii N.S., Krylova A.B., Prognoz teplovoi reaktsii gorodskoi sredy Sankt-Peterburga i Kieva na izmenenie klimata (po materialam s"emok sputnikami EOS i Landsat) (Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal reply on the climate change (on the base of EOS and Landsat satellite imagery)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 176–191.
7. http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf.
8. http://www.complexdoc.ru/ntdtext/537016.
9. Kreit F., Blek U., *Osnovy teploperedachi* (Fundamentals of heat transfer), Moscow: "Mir", 1983, 512 p.
10. Kritsuk S.G., Gornyy V.I., Latypov I.Sh., Povyshenie detal'nosti sputnikovogo kartografirovaniya teplofizicheskikh kharakteristik zemnoi poverkhnosti (Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermalproperties of land surface). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13. No. 5, pp. 277–290.
11. Kritsuk S.G., Kartirovanie boreal'nykh lesov na osnove sputnikovykh dannykh (na primere OOPT Leningradskoi oblasti) (Boreal forest mapping on the base of satellite data (nature reserve of Leningrad region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 255 265.

12. Stankevich S.A., Filippovich V.E., Lubskii N.S., Krylova A.B., Kritsuk S.G., Brovkina O.V., Gornyy V.I., Tronin A.A., Interkalibratsiya metodov vosstanovleniya termodinamicheskoi temperatury poverkhnosti urbanizirovannoi territorii po materialam teplovoi kosmicheskoi s"emki (Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal-infrared satellite imaging), *Ukraïns'kii zhurnal distantsiinogo zonduvannya Zemli*, 2015, No. 7, pp. 14–23.
13. Cracknell A. P., Xue Y., Thermal inertia determination from space − a tutorial review, *International Journal of Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 3, pp. 431−461.
14. Huang Q., Lu Y., Ulhoi J., The Effect of Urban Heat Island on Climate Warming in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2015, No. 12 (8), P. 8773–8789, available at: http://www.mdpi.com/1660-4601/12/8/8773/htm.
15. Price J.C., Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data, *Monthly Weather Review*, 1979, Vol. 107, No. 11, pp. 1554–1557.
16. Price J.C., On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales, *Journal of Applied Meteorology*, 1982, Vol. 21, pp. 1111−1122.
17. Watson K., Rowan L.C., Offield T.V., Application of Thermal Modeling in Geologic Interpretation of IR Images, *Proceedings of 7-th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, 1971, pp. 2017−2041.