

УДК 711.142:528.8.041.3

## Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки

С. А. Станкевич<sup>1\*</sup>, В. Е. Филиппович<sup>1</sup>, Н. С. Лубский<sup>1</sup>, А. Б. Крылова<sup>1</sup>, С. Г. Крицук<sup>2</sup>, О. В. Бровкина<sup>2</sup>, В. И. Горный<sup>2</sup>, А. А. Тронин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГУ "Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины", Киев, Украина

<sup>2</sup> ФГБУН "Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук", Санкт-Петербург, Российская Федерация

В рамках Российско-Украинского международного проекта "Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съёмок)", поддержанного РФФИ (№14-05-90416) и НАН Украины (№10-05-14) двумя научными коллективами проведена независимая сравнительная оценка (интеркалибрация) двух методов восстановления термодинамической температуры земной поверхности по материалам тепловых космических съёмок Киева, выполненных системами низкого — EOS/MODIS и среднего — Landsat-8/TIRS пространственного разрешения. Исследовались алгоритмы восстановления термодинамической температуры и коэффициентов теплового излучения, построенные как на использовании регрессионных зависимостей, так и наземных заверочных измерений. Установленное расхождение определения температуры (среднее отклонение оценено как  $-0.93^{\circ}\text{C}$ ) является вполне приемлемым для количественного температурного мониторинга городской среды по материалам тепловой инфракрасной космической съёмки.

**Ключевые слова:** спутниковая съёмка, городская территория, земная поверхность, инфракрасное излучение, восстановление термодинамической температуры, коэффициент теплового излучения, интеркалибрация

© С. А. Станкевич, В. Е. Филиппович, Н. С. Лубский, А. Б. Крылова, С. Г. Крицук, О. В. Бровкина, В. И. Горный, А. А. Тронин. 2015

Аэрокосмическая съёмка в дальнем инфракрасном (8–14 мкм) диапазоне важна при решении широкого круга задач охраны окружающей среды и поисков полезных ископаемых [10]. К одной из актуальных таких задач можно отнести мониторинг тепловых режимов и теплопотерь городов и промышленных территорий.

В настоящее время системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) установленные на космических аппаратах серий EOS и Landsat обеспечивают оперативный долговременный мониторинг земной поверхности в дальнем инфракрасном диапазоне, что позволяет картировать температуру земной поверхности (ТЗП), в том числе и урбанизированных территорий и анализировать её пространственно-временные изменения [13]. При этом, если для восстановления ТЗП по материалам тепловых космических съёмок низкого разрешения, выполненных спутниками серии EOS используется, в основном, метод разделенных окон (split window method) [6], то для восстановления ТЗП по материалам съёмки спутниками серии Landsat ТМ, имеющих только один инфракрасный (ИК) тепловой канал, используются более сложные подходы. Только в последние годы, в связи с запуском спут-

ника Landsat-8 появилась возможность использовать метод разделенных окон и для тепловых материалов среднего разрешения. При этом важнейшим показателем являются погрешности восстановления ТЗП по результатам дистанционных измерений. Эти погрешности возникают из-за различных неопределённостей, например — параметров атмосферы, недоопределённости системы уравнений, используемых для восстановления ТЗП [1]. Известен ряд алгоритмов восстановления ТЗП по результатам дистанционных тепловых аэрокосмических съёмок спутниками серии Landsat [18], обладающих как достоинствами, так и определёнными недостатками. Актуальной задачей является сравнение погрешностей алгоритмов, применяемых при восстановлении ТЗП по результатам космической съёмки тепловыми каналами спутников серии Landsat или, иными словами, интеркалибрация. Поэтому целью настоящей статьи является интеркалибрация двух различных алгоритмов восстановления ТЗП по результатам ИК съёмок спутников серии Landsat, используемых российскими и украинскими участниками международного проекта "Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съёмок)", поддержанного РФФИ (№ 14-05-90416) и НАН Украины (№ 10-05-14).

\* e-mail: st@casre.kiev.ua

### Методы восстановления термодинамической ТЗП по материалам тепловых космических съёмок

*Восстановление термодинамической температуры земной поверхности по многоспектральным изображениям спутников Landsat с использованием библиотечных значений коэффициентов теплового излучения различных типов земной поверхности*

Практические дистанционные измерения ТЗП выполняются в условиях существенной неоднородности свойств, как земных покрытий, так и слоя атмосферы. Поэтому значения температуры будут отличаться для разных участков инфракрасного изображения, даже если они относятся к земным покрытиям, находящимся в близких физических условиях.

Алгоритмы дистанционного определения температуры основываются на законе теплового излучения Планка:

$$L(l, T) = e(l) M(l, T) = \frac{\varepsilon(\lambda) c_1 \lambda^5}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (1)$$

где  $L(\lambda, T)$  — спектральная плотность энергетической яркости земной поверхности,  $\varepsilon(\lambda)$  — спектральный коэффициент теплового излучения,  $M(\lambda, T)$  — спектральная плотность энергетической яркости абсолютно чёрного тела,  $c_1 = 2hc^2 = 1.191 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$

и  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  — первая и вторая постоянные закона Планка,  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка,  $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света в вакууме,  $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  — постоянная Больцмана,  $\lambda$  — длина волны электромагнитного излучения [17].

Температура может быть найдена обращением (1):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L} + 1\right)}. \quad (2)$$

Сложность дистанционного определения термодинамической температуры земной поверхности заключается в необходимости учета поглощения инфракрасного излучения в атмосфере и в разделении термодинамической температуры и коэффициента теплового излучения. Обе задачи нуждаются либо в знании непосредственно коэффициента теплового излучения наблюдаемой земной поверхности, либо каких-то других её характеристик, позволяющих его оценить [23]. Учет влияния атмосферы может быть реализован даже для одного спектрального диапазона, разделение же термодинамической температуры и коэффициента излучения

является сложной проблемой и требует применения специальных подходов [27].

Относительная неопределённость оценки температуры (2) пропорциональна неопределённости спектрального коэффициента теплового излучения [12]

$$\frac{\Delta T}{T} = - \frac{\lambda T}{c_2} \frac{\Delta \varepsilon(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}, \quad (3)$$

что вынуждает, прежде всего, обеспечить точное определение именно его.

Таким образом, основной проблемой при определении температуры земной поверхности по спутниковым изображениям дальнего инфракрасного диапазона выступает неопределённость коэффициента теплового излучения земной поверхности. Данная неопределённость делает задачу расчёта термодинамической температуры математически некорректной: даже в случае многоспектральной инфракрасной съёмки количество неизвестных в уравнениях радиационного переноса всегда на единицу превышает количество уравнений в системе [14].

Наиболее точным и достоверным считается определение коэффициента теплового излучения на основе классификации покрытий земной поверхности и привлечения соответствующих спектральных библиотек [22, 6, 19]. Значение коэффициента теплового излучения зависит от расположения диапазонов спектрометра, и может быть оценено с использованием соответствующих спектральных библиотек. В частности, для 27 тестовых участков на территории Киева (рис. 1) при помощи профессионального полевого пирометра были экспериментально измерены значения широкополосных коэффициентов теплового излучения типовых земных покрытий (табл. 1).

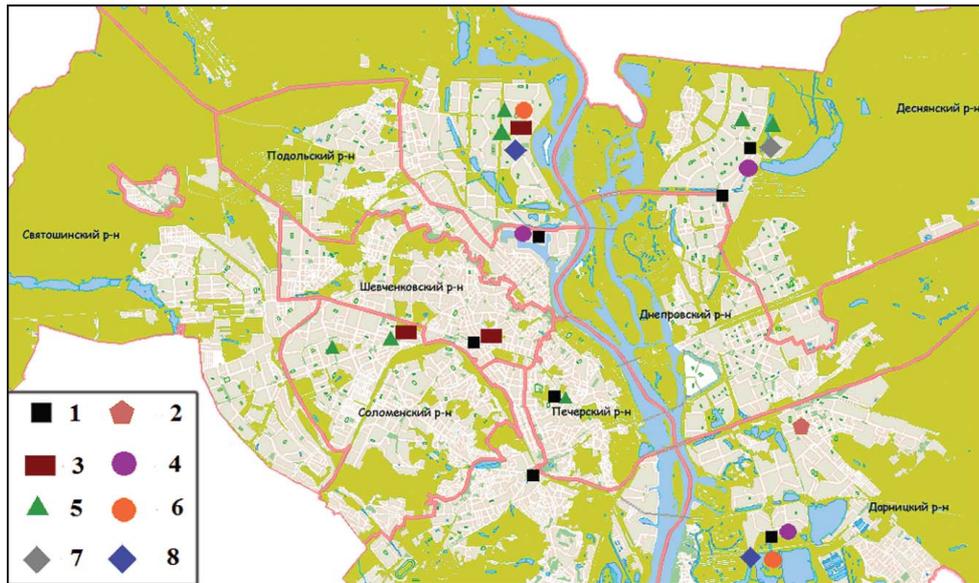
Отдельную проблему составляет определение коэффициента теплового излучения разреженного растительного покрова. Обычно, его оценка выполняется на основе данных о вегетационном индексе (NDVI) [26]. Для этого рассчитывается проективное покрытие поверхности растительностью —  $P_v$ :

$$P_v \equiv \left( \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_0}{\text{NDVI}_1 - \text{NDVI}_0} \right)^2, \quad (4)$$

где NDVI — нормализованный дифференциальный вегетационный индекс, доли единицы;  $\text{NDVI}_0$  — нормализованный дифференциальный вегетационный индекс почвы, лишённой растительности;  $\text{NDVI}_1$  — нормализованный дифференциальный вегетационный индекс полного покрытия территории растительностью.

Для участков поверхности покрытых растительностью спектральный коэффициент теплового излучения описывается соотношением [21]

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_1(\lambda) P_v + \varepsilon_0(\lambda) (1 - P_v) + \Delta \varepsilon(\lambda), \quad (5)$$



**Рис. 1.** Тестовые участки пирометрических измерений на территории Киева.

1 — асфальт; 2 — почва; 3 — камень; 4 — прорезиненное покрытие; 5 — трава; 6 — песок; 7 — сталь; 8 — водные поверхности

**Таблица 1.**

Измеренные коэффициенты теплового излучения типовых земных покрытий тестовых участков на территории Киева (нумерация типов земных покрытий соответствует рис. 1)

№	Тип земного покрытия	Количество участков	Коэффициент теплового излучения
1	Асфальт	8	093
2	Трава	7	096
3	Почва	1	090
4	Песок	2	093
5	Камень	3	085
6	Сталь	1	085
7	Прорезиненное покрытие	3	088
8	Вода	2	093

где  $\varepsilon_1(\lambda)$  и  $\varepsilon_0(\lambda)$  — спектральные коэффициенты теплового излучения растительности и открытой поверхности соответственно,  $\Delta\varepsilon(\lambda)$  — поправка, обусловленная неровностями местности. При работе с мелкомасштабными инфракрасными изображениями могут использоваться значения  $\varepsilon_1(\lambda) \approx 0.985$  и  $\Delta\varepsilon(\lambda) \approx 0.005$ , а  $\varepsilon_0(\lambda)$  зависит от типа нерастительного земного покрытия [9].

Если коэффициент теплового излучения  $\varepsilon$  определен, тогда температуру земной поверхности можно рассчитать по модифицированному соотношению (2) [11]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_0} + 1\right)}, \quad (6)$$

где  $L_0$  — спектральная плотность энергетической яркости на земной поверхности, полученная в результате атмосферной коррекции,  $K_1$  и  $K_2$  — аппаратно зависимые константы сенсора. Их значения для спутниковых систем семейства Landsat приведены в табл. 2.  $L_0$  оценивается по формуле:

$$L_0 = \frac{L - L^\uparrow}{\varepsilon\tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L^\downarrow, \quad (7)$$

где  $L$  — спектральная плотность энергетической яркости на апертуре сенсора,  $L^\uparrow$  и  $L^\downarrow$  — спектральная плотность энергетической яркости восходящего и нисходящего излучения,  $\tau$  — коэффициент пропускания атмосферы.

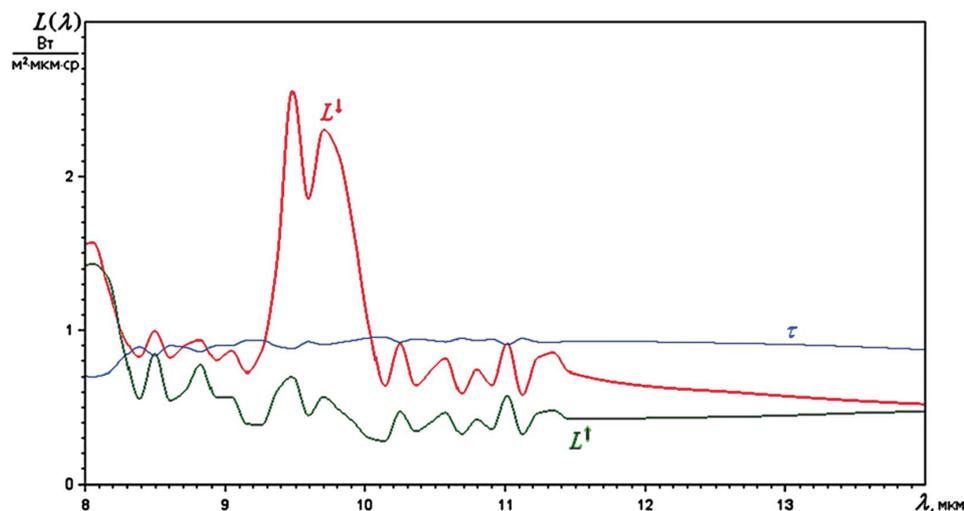
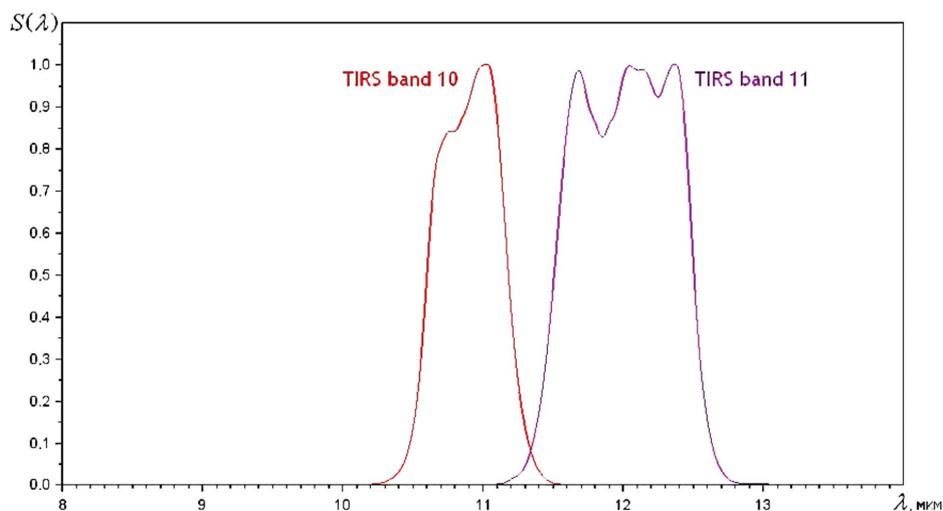
Существует специализированное программное обеспечение для моделирования технических характеристик различных типов съёмочной аппаратуры с учётом, в том числе, атмосферных условий, например, SENSOR++ [4]. В частности, опубликованы расчёты спектральных параметров  $L^\uparrow$ ,  $L^\downarrow$  и  $\tau$ , необходимых для учёта влияния атмосферы при инфракрасной съёмке [2]. Пример результатов такого расчета представлен на рис. 2.

Свёртка кривых рис. 2 со спектральными чувствительностями инфракрасных рабочих спектральных диапазонов сенсора (рис. 3) позволяет получить атмосферные параметры конкретной съёмочной аппаратуры. В частности, для TIRS спутниковой системы Landsat-8  $L^\uparrow = 0.420$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}$ ),  $L^\downarrow = 0.728$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}$ ),  $\tau = 0.934$  для

**Таблица 2.**

Аппаратные константы инфракрасных сенсоров спутниковых систем серии Landsat [7]

Константы сенсора	Спутниковые системы				
	Landsat MSS band 6	Landsat TM band 6	Landsat ETM+ band 6	Landsat TIRS band 10	Landsat TIRS band 11
$K_1$	671.62	607.76	666.09	77489	480.89
$K_2$	1284.30	1260.56	1282.71	1321.08	1201.14

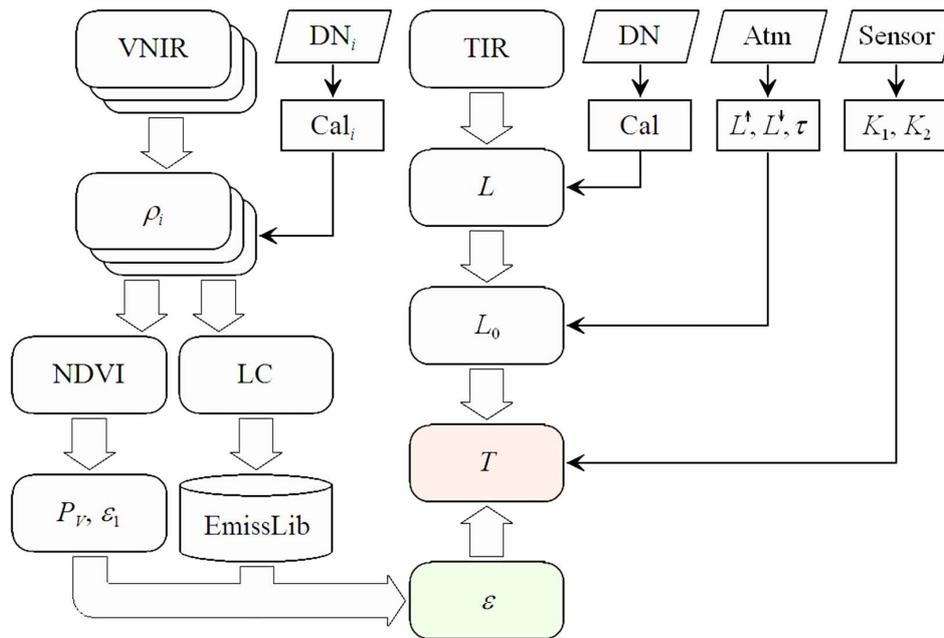
**Рис. 2.** Спектральные распределения атмосферных параметров  $L^{\uparrow}$ ,  $L^{\downarrow}$  и  $\tau$ **Рис. 3.** Спектральные характеристики чувствительности инфракрасной съёмочной аппаратуры TIRS спутника Landsat-8

рабочего спектрального диапазона 10 (10.8 мкм) и  $L^{\uparrow} = 0.435$  Вт/(м<sup>2</sup>·мкм·ср),  $L^{\downarrow} = 0.655$  Вт/(м<sup>2</sup>·мкм·ср),  $\tau = 0.926$  для рабочего спектрального диапазона 11 (12 мкм).

Порядок определения температуры земной поверхности по материалам многоспектральной съёмки в видимом, ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах поясняется схемой (рис. 4).

Обработка данных проводится в два потока: изображений видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (VNIR), и изображений собственно

дальнего инфракрасного диапазона (TIR). Обе группы изображений из зарегистрированных цифровых кодов (DN) по калибровочным коэффициентам (Cal) пересчитываются в спектральную плотность энергетической яркости на апертуре сенсора  $L$ , а изображения VNIR — далее на зональные коэффициенты отражения земной поверхности  $c_i$  в каждом спектральном канале. По ним выполняется классификация земных покрытий (LC) и вычисляется вегетационный индекс NDVI. Для участков, у которых значения NDVI, соответству-



**Рис. 4.** Диаграмма потоков данных определения температуры земной поверхности по материалам многоспектральной съёмки в видимом, ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах

ют частичному растительному покрову, определяется проективное покрытие растительного покрова (4), а за ним в соответствии с (5) — коэффициент теплового излучения территории с растительностью. Коэффициенты теплового излучения искусственных поверхностей, открытых почв и других нерастительных покрытий выбираются из спектральной библиотеки (EmissLib). Во втором потоке данных спектральная плотность энергетической яркости на апертуре сенсора пересчитывается сначала в спектральную плотность энергетической яркости на земной поверхности по (4), а потом — в температуру земной поверхности по (6). Аппаратные константы сенсора извлекаются из его спецификаций (Sensor). Необходимые в (4) атмосферные функции  $L^{\uparrow}$ ,  $L^{\downarrow}$  и  $\tau$  контролируются состоянием атмосферы (Atm), характеристики которого могут быть получены путём прямых наземных измерений, например, из всемирной атмосферно-измерительной сети AERONET (Aerosol Robotic Network) [16], из соответствующих спутниковых информационных продуктов, например, EOS/MODIS спутниковой системы EOS [25] или количественным моделированием [8].

*Оценка погрешностей дистанционного определения температуры земной поверхности по многоспектральным изображениям спутниковой системы Landsat*

Для оценки погрешностей определения температуры земной поверхности выполнялась совместная обработка материалов инфракрасной спутни-

ковой съёмки Landsat-8 территории Киева 06.06.2014 и синхронных подспутниковых пирометрических измерений на 27 тестовых участках (см. рис. 1).

Для определения коэффициентов теплового излучения обработка спутникового изображения выполнялась по вышеописанному алгоритму с промежуточным расчётом проективного покрытия растительности и типов земных покрытий (рис. 5).

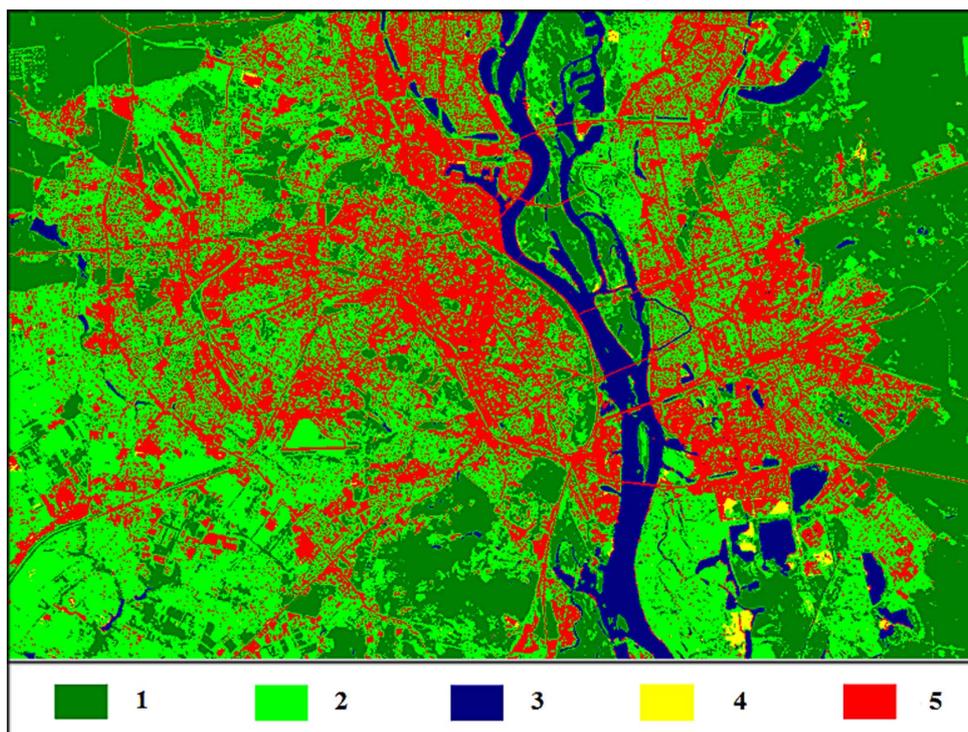
Для сравнения также была проведена обработка по упрощённому алгоритму на основе уравнения радиационного переноса [15] с определением коэффициента теплового излучения по известной регрессионной зависимости вида

$$\varepsilon(\lambda) \approx 1.0098 + 0.047 \ln \text{NDVI}, \quad (8)$$

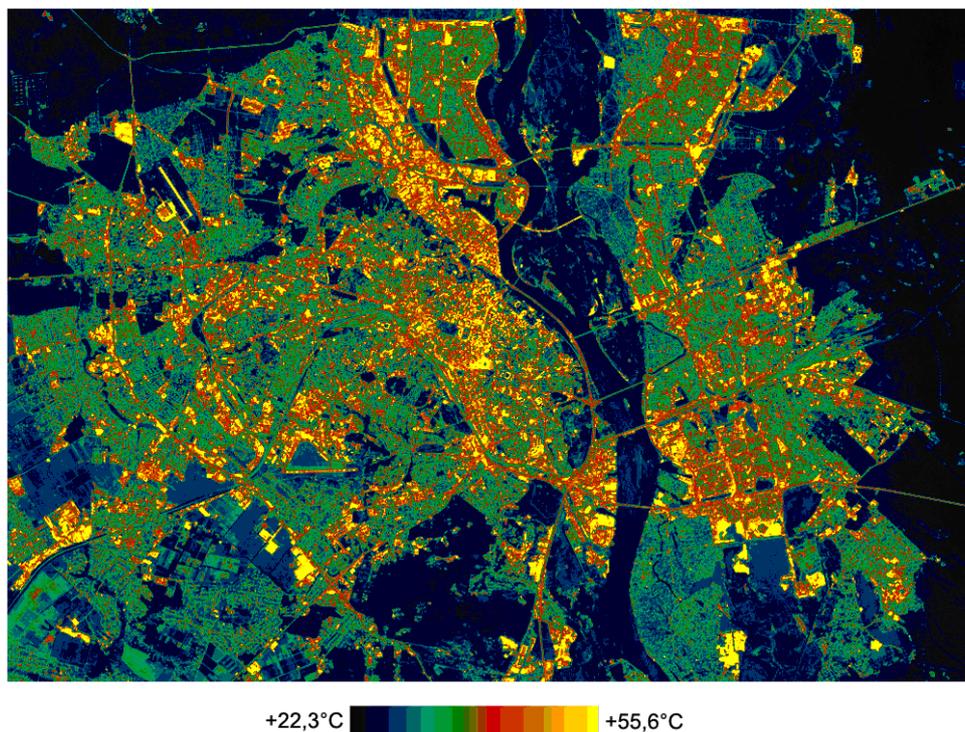
справедливой в диапазоне значений NDVI от 0.157 до 0.727 [20].

На рис. 6 показана карта термодинамической температуры земной поверхности, восстановленной по результатам обработки в соответствии со схемой (рис. 4).

Среднее расхождение температуры с результатами наземных измерений на тестовых участках составляет — 0.93°C, максимальное — 5.34°C, что довольно неплохо по сравнению с упрощённым алгоритмом с вычислением по (8): среднее расхождение температуры — 3°C, максимальное — 11°C. Полученные оценки хорошо согласуются с уже известными результатами [24], что косвенно подтверждает их правильность.



**Рис. 5.** Карта районирования территории Киева по типу поверхностей, построенная на основе классификации материалов съёмки спутником Landsat-8.  
1 — густой растительный покров; 2 — разреженный растительный покров; 3 — водные поверхности; 4 — песчаные поверхности; 5 — искусственные поверхности



**Рис. 6.** Карта термодинамической температуры земной поверхности территории Киева, восстановленной по материалам тепловой съёмки спутником Landsat-8 (дата съёмки: 31 июля 2014 г., время съёмки: 9:55 GMT) с использованием результатов наземной заверки (методика украинской стороны проекта)

*Восстановление термодинамической температуры земной поверхности по тепловым изображениям спутников Landsat и EOS (MODIS) с использованием модели MODTRAN*

Восстановление термодинамической температуры земной поверхности урбанизированной территории включало в себя следующие этапы:

- На ту же дату (31 июля 2014) и на момент времени (8:20 GMT) близкий ко времени съёмки спутником Landsat-8 (9:55 GMT) в форме карты были получены данные спутника EOS (Terra) о содержании воды в атмосфере над Киевом.
- Для полного диапазона содержаний воды в атмосфере на указанную дату по модели MODTRAN для летней атмосферы средних широт получены оценки пропускания и излучения атмосферы и рассчитаны коэффициенты регрессии для восстановления этих параметров по содержанию воды в атмосфере.
- Полученные регрессионные коэффициенты были использованы для расчета атмосферных параметров. Температура земной поверхности и спектральные коэффициенты излучения восстанавливались путем минимизации разности температур в двух тепловых каналах спутника Landsat-8, в качестве дополнительного условия использована связь между максимальным и минимальным коэффициентами излучения в двух различных диапазонах теплового спектра [3].
- Средняя по двум каналам спутника Landsat-8 оценка принималась за искомую термодинамическую температуру, а разность рассматривалась как количественная характеристика ошибки восстановления температуры (среднее значение  $0.00 \pm 0.015$  K).

Сравнение данных по оценкам коэффициента теплового излучения природных и искусственных поверхностей, полученные различными методами (табл. 1, 3) показывает, что для травянистых поверхностей совпадение значений высокое. В то же время, для водной поверхности значения коэффициентов теплового излучения существенно отличаются.

**Интеркалибрация методики восстановления температуры земной поверхности по тепловым изображениям спутников Landsat методикой восстановления температуры земной поверхности по материалам съёмки на основе модели MODTRAN**

Интеркалибрация двух методов восстановления температуры по результатам спутниковой ИК-тепловой съёмки (рис. 7) показывает, что имеется приближенно линейная зависимость между результата-

ми восстановления ТЗП, полученными двумя вышеописанными методиками. При этом, отмечается систематическое различие между двумя массивами восстановленных температур, достигающее  $5^{\circ}\text{C}$ .

Необходимо отметить, что наибольшие расхождения в результатах отмечаются на акваториях (см. рис. 7), что может быть вызвано различными значениями коэффициентов теплового излучения использованными в рамках двух методик. Кроме того, на гистограмме водные поверхности образуют самостоятельное “облако” (см. рис. 7). Возможно, что это вызвано спецификой зеркального излучения и отражения длинноволновой радиации на поверхности воды. В результате на апертуру спутникового сканера может попадать меньшая энергия, чем от участков суши, где преобладает диффузное отражение. Этот эффект должен приводить к заниженным значениям температуры поверхности акваторий, что и отмечается в данном случае (см. рис. 7).

В целом, следует отметить, что пространственное распределение восстановленных двумя методами ТЗП имеет форму симметричного вытянутого “облака” (см. рис. 7), что свидетельствует о линейности в пределах исследованного диапазона температур обоих использованных преобразований (методик). Кроме того, в пределах большей части объектов поверхности городской среды (ПГС), имевших температуру в диапазоне от  $+32^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , различия восстановленных температур не превышают  $1^{\circ}\text{C}$ , что, например, вполне приемлемо для картирования участков перегрева элементов городской среды.

Учитывая наземную верификацию метода восстановления ТЗП по результатам многоспектральной космической съёмки только спутником Landsat-8, в дальнейшем, при решении измерительных задач целесообразно использовать эту методику как наиболее проверенную.

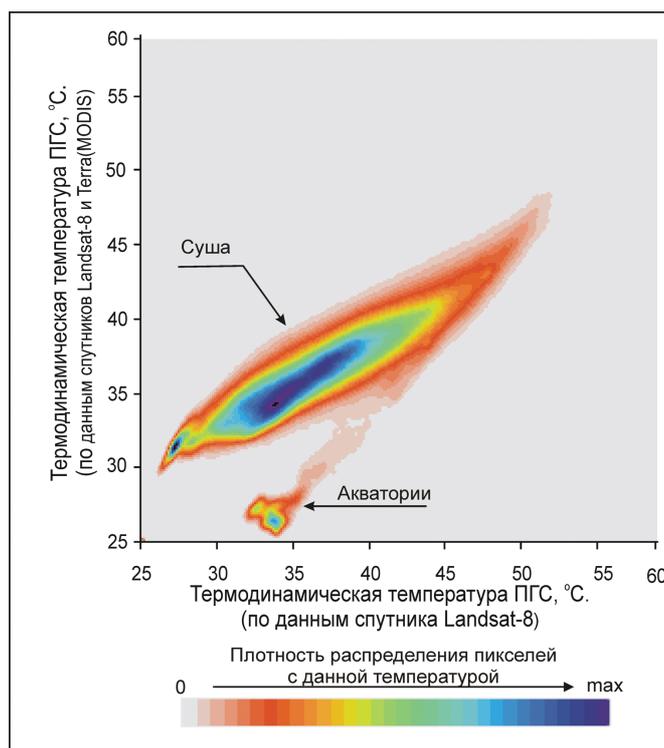
**Выводы**

1. Интеркалибрация двух методов восстановления температуры земной поверхности урбанизированной территории показала, что в рамках диапазона температур, соответствующего периоду максимального сезонного прогрева элементов городской среды Киева, оба метода могут быть охарактеризованы как близкое к линейному преобразование спектральных плотностей энергетической яркости земных покровов.
2. По результатам интеркалибрации алгоритм расчёта температуры земной поверхности, основанный на районировании территории по типу покрытий, может быть выбран в качестве основного в рамках решения измерительных задач, использующих материалы съёмки спутниками Landsat-8. Незначительное по сравнению с контактными методами занижение дистанционных оценок тем-

**Таблица 3.**

Средние значения восстановленных по материалам съёмки спутника EOS (MODIS) параметров земных покровов и атмосферы в границах Киева и окрестностей, которые были использованы для восстановления термодинамической температуры по данным съёмки Landsat-8 (дата: 31 июля 2014 г.)

Коэффициенты излучения типовых земных покровов	Канал 10 (10,8 мкм)	Канал 11 (12 мкм)
Травянистая растительность	0.946	0.963
Древесная растительность	0.952	0.966
Городские территории	0.937	0.956
Водная поверхность акваторий	0.987	0.986
Среднее содержание воды в атмосфере, $г/см^2$		2.7



**Рис. 7.** Гистограмма распределения термодинамической температуры земной поверхности, восстановленной по материалам съёмки только спутником Landsat-8/TIRS (методика, используемая ЦАКИЗ ИГН НАН Украины) и по данным съёмки спутниками Landsat-8/TIRS и EOS/MODIS (методика, используемая НИЦЭБ РАН)

пературы земной поверхности (среднее отклонение —  $0.93^{\circ}\text{C}$ , максимальное —  $5.34^{\circ}\text{C}$ ) является вполне приемлемым для практического температурного мониторинга ПГС по материалам инфракрасной космической съёмки среднего разрешения.

3. Дальнейшие исследования следует направить на снижение погрешностей дистанционного картографирования температуры земной поверхности путём более детального районирования исследуемой территории за счёт увеличения количества классов при классификации земных покровов по многоспектральным спутниковым изображениям и на разработку более прецизионной методики восстановления температуры поверхности водной среды по материалам съёмки спутником Landsat-8.

### Благодарности

Данное исследование выполнено в рамках российско-украинского научно-исследовательского проекта “Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съёмок)” при финансовой поддержке НАН Украины (проектный грант № 10-05-14) и РФФИ (проектный грант № 14-05-90416).

### Литература

1. Баранов В. Л. Алгоритм автоматизованого оцінювання спектрального коефіцієнта теплового випромінювання / В. Л. Баранов, С. В. Водоп'ян, Р. В. Гришук // Вісник ЖДТУ.— 2006.— № 4 (39).— С. 77–83.
2. Горный В. И. О возможности картографирования фи-

- зико-географических зон тепловой космической съемкой / В. И. Горный, С. Г. Крицук // Доклады академии наук.— 2006.— Т. 411.— № 5.— С. 684–686.
3. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов.— М.: Советское радио, 1978.— 400 с.
  4. Попов М. О. Перспективи використання інфрачервоного аерознімання для вирішення природоресурсних і спеціальних задач / М. О. Попов, М. І. Ліхоліт, С. А. Станкевич, В. В. Полежаєв, В. М. Тягун, О. В. Титаренко // Матеріали науково-практичної конференції “Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій”.— Київ: ІЗІТ НАУ, 2011.— С. 33–39.
  5. Chander G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder // *Remote Sensing of Environment*.— 2009.— Vol. 113.— No. 5.— P. 893–903.
  6. Coll C. Validation of Landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements / C. Coll, J. M. Galve, J. M. Sánchez, V. Caselles // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.— 2010.— Vol. 48.— No. 1.— P. 547–555.
  7. Felde G. W. Water vapor retrieval using the FLAASH atmospheric correction algorithm / G. W. Felde, G. P. Anderson, J. A. Gardner, S. M. Adler-Golden, M. W. Matthew, A. Berk // *Proceedings of SPIE*.— 2004.— Vol. 5425.— P. 386–396.
  8. Gillespie A. R. Temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images / A. R. Gillespie, S. Rokugawa, S. J. Hook, T. Matsunaga, A. B. Kahle // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.— 1998.— Vol. 36.— No. 4.— P. 1113–1126.
  9. Guanter L. A method for the surface reflectance retrieval from PROBA/CHRIS data over land: Application to ESA SPARC campaigns / L. Guanter, L. Alonso, J. Moreno // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.— 2005.— Vol. 43.— No. 12.— P. 2908–2917.
  10. Kaspersen P.S. Using Landsat vegetation indices to estimate impervious surface fractions for European cities / P. S. Kaspersen, R. Fensholt, M. Drews // *Remote Sensing*.— 2015.— Vol. 7.— No. 6.— P. 8224–8249.
  11. Kaufman Y. J. Remote-sensing of water-vapor in the near IR from EOS/MODIS / Y. J. Kaufman, B. C. Gao // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.— 1992.— Vol. 30.— No. 5.— P. 871–884.
  12. Li Z.-L. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives / Z.-L. Li, B.-H. Tang, H. Wu, H. Ren, G. Yan, Z. Wan, I. F. Trigo, J. A. Sobrino // *Remote Sensing of Environment*.— 2013.— Vol. 131.— No. 12.— P. 14–37.
  13. Paproth C. SENSOR++: Simulation of remote sensing systems from visible to thermal infrared / C. Paproth, E. Schlyler, P. Scherbaum, A. Bärner // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.— 2012.— Vol. XXXIX.— Part B1.— P. 257–260.
  14. Perez Hoyos I. C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity / I. C. Perez Hoyos // *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*.— 2014.— Vol. 2.— No. 2.— P. 26–30.
  15. Pérez-Ramírez D. Evaluation of AERONET precipitable water vapor versus microwave radiometry, GPS, and radiosondes at ARM sites / D. Pérez-Ramírez, D. N. Whiteman, A. Smirnov, H. Lyamani, B. N. Holben, R. Pinker, M. Andrade, L. Alados-Arboledas // *Journal of Geophysical Research*.— 2014.— Vol. 119.— No. 15.— P. 9596–9613.
  16. *Radiometric Temperature Measurements Fundamentals* / Z. M. Zhang, B. K. Tsai, G. Machin (Eds).— Amsterdam: Academic Press, 2010.— 356 p.
  17. Snyder W. C. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space / W. C. Snyder, Z. Wan, Y. Zhang, Y.-Z. Feng // *International Journal of Remote Sensing*.— 1998.— Vol. 19.— No. 14.— P. 2753–2774.
  18. Sobrino J. A. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors / J. A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz, G. Soria, M. Romaguera, L. Guanter // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.— 2008.— Vol. 46.— No. 2.— P. 316–327.
  19. Tang H. *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications* / H. Tang, Z.-L. Li.— Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.— 302 p.
  20. *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications* / C. Kuenzer, S. Dech (Eds).— Dordrecht: Springer, 2013.— 556 p.
  21. Valor E. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas / E. Valor, V. Caselles // *Remote Sensing of Environment*.— 1996.— Vol. 57.— No. 3.— P. 167–184.
  22. Van de Griend A. A. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces / A. A. Van de Griend, M. Owe // *International Journal of Remote Sensing*.— 1993.— Vol. 14.— No. 6.— P. 1119–1131.
  23. Wan Z. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space / Z. Wan, J. Dozier // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.— 1996.— Vol. 34.— No. 4.— P. 892–905.
  24. Wittich K.-P. Some simple relationships between land-surface emissivity, greenness and the plant cover fraction for use in satellite remote sensing / K.-P. Wittich // *International Journal of Biometeorology*.— 1997.— Vol. 41.— No. 2.— P. 58–64.
  25. Yang H. Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data / H. Yang, L. F. Zhang, X. Zhang, C. Fang, Q. Tong // *Journal of Remote Sensing*.— 2011.— Vol. 15.— No. 6.— P. 1242–1254.
  26. Yu X. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS — comparison between radiative transfer equation-

based method, split window algorithm and single channel method / X. Yu, X. Guo, Z. Wu // Remote Sensing.— 2014.— Vol. 6.— No. 10.— P. 9829–9852.

27. Zhao S. Comparison of two split-window methods for

retrieving land surface temperature from MODIS data / S. Zhao, Q. Qin, Y. Yang, Y. Xiong, G. Qiu // Journal of Earth System Science.— 2009.— Vol. 118.— No. 4.— P. 345–353.

#### ІНТЕРКАЛІБРАЦІЯ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ УРБАНІЗОВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ТЕПЛОВОЇ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ

С. А. Станкевич, В. Є. Філіпович, Н. С. Лубський, Г. Б. Крилова, С. Г. Кріцук, О. В. Бровкіна, В. І. Горний, А. А. Тронін

У рамках Російсько-Українського міжнародного проекту “Дослідження впливу урбанізації на мікроклімат міст (за матеріалами теплових аерокосмічних зйомок)”, підтриманого РФФД (№14-05-90416) і НАН України (№10-05-14) двома науковими колективами проведена незалежна порівняльна оцінка (інтеркалібрація) двох методів відновлення термодинамічної температури земної поверхні за матеріалами теплових космічних зйомок Києва, виконаних системами низького — EOS/MODIS, і середнього — Landsat 8/TIRS просторового розрізнення. Досліджувалися алгоритми відновлення термодинамічної температури і коефіцієнтів теплового випромінювання, побудовані як на використанні регресійних залежностей, так і наземних завіркових вимірювань. Встановлено розбіжність визначення температури (середнє відхилення оцінено як  $-0.93^{\circ}\text{C}$ ) є цілком прийнятним для кількісного температурного моніторингу міського середовища за матеріалами теплової інфрачервоної космічної зйомки.

**Ключові слова:** супутникова зйомка, міська територія, земна поверхня, інфрачервоне випромінювання, відновлення термодинамічної температури, коефіцієнт теплового випромінювання, інтеркалібрація

#### INTERCALIBRATION OF METHODS FOR THE LAND SURFACE THERMODYNAMIC TEMPERATURE RETRIEVING INSIDE URBAN AREA BY THERMAL-INFRARED SATELLITE IMAGING

S. A. Stankevich, V. E. Filipovich, N. S. Lubsy, A. B. Krylova, S. G. Kritsuk, O. V. Brovkina, V. I. Gornyy, A. A. Tronin

A comparative independent evaluation (intercalibration) of two methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving by thermal infrared satellite imaging of Kiev was done in the framework of joint Russian and Ukrainian project “Investigation of urbanization influence on city’s microclimate (using thermal infrared satellite mapping)”, supported by RFBR (No 14-05-90416) and NAS of Ukraine (No 10-05-14). Both, low resolution EOS/MODIS and medium-resolution Landsat 8/TIRS thermal infrared images were processed. Algorithms for the thermodynamic temperature and emissivity retrieving based on regressions and ground-truth measurements were applied and compared. Average regular error of land surface temperature retrieving was estimated as  $-0.93^{\circ}\text{C}$ . Such accuracy is quite acceptable for the urban environment quantitative temperature monitoring by thermal infrared satellite imaging.

**Keywords:** satellite imaging, urban area, land surface, infrared irradiation, retrieving thermodynamic temperature, emissivity, intercalibration