# Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности

# С.Г. Крицук, В.И. Горный, И.Ш. Латыпов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Санкт-Петербург, Россия E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Целью исследования является повышение геометрического разрешения карт теплофизических характеристик земной поверхности (тепловая инерция, тепловой поток, доля испаряемости, коэффициент турбулентного теплообмена), подготавливаемых по результатам многоразовой тепловой космической съемки низкого геометрического разрешения. Для этого по материалам тепловой космической съемки спутниками EOS (геометрическое разрешение ~1000 м) строились регрессионные модели на основе сравнения значений теплофизических характеристик земной поверхности, восстановленных с помощью детерминированного алгоритма, с предикторами – картами дневной температуры земной поверхности и коэффициентов спектральной яркости, зарегистрированными той же съемочной системой низкого геометрического разрешения. Далее, модели применялись к набору изображений, полученных спутником Landsat 8 (геометрическое разрешение 30 м ÷ 100 м). Результатом явились регрессоры – более детальные карты теплофизических характеристик земной поверхности. Количественная оценка геометрического разрешения полученных карт выполнена путем сравнения со специальными «шкалами» – снимками того же масштаба и на ту же территорию, но различной детальности. В качестве меры согласия использовано количество взаимной информации между картой теплофизической характеристики и изображениями «шкалы». В результате доказано, что геометрическое разрешение исходных карт теплофизических свойств повышено более чем в 10 раз и составило 90 м. Выполнена оценка ошибок, возникающих из-за экстраполяции регрессионной модели на больший диапазон предикторов высокого разрешения. Показано, что полученные ошибки не препятствуют решению многих практических задач. Регрессионный подход позволяет в городах использовать материалы тепловой космической съемки спутников серии EOS для решения задач экологической безопасности и энергосбережения уже на уровне кварталов. а не только для районов крупных городов.

Ключевые слова: спутник, тепловая съемка, поверхность, карта, теплофизические характеристики, геометрическое разрешение, регрессия, повышение разрешения

Одобрена к печати: 13.10.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-277-290

#### Введение

В рамках регулярного космического мониторинга применение систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), работающих в инфракрасном (ИК) тепловом диапазоне электромагнитных волн (ЭМВ), открывает широкие возможности при решении многих народнохозяйственных задач, таких как поиски полезных ископаемых (Горный и др., 1993, 2008); охрана окружающей среды (Горный, Крицук, 2006; Горный, 2007; Горный и др., 2011, 2013); энергосбережение (Горный и др., 1997). В методическом плане, чрезвычайно эффективным к обработке информации, собираемой тепловой космической съемкой (ТКС), оказался теплоинерционный подход (Watson et al., 1971; Горный и др., 1993; Xue, Cracknell, 1995; Горный, 2004). В рамках этого подхода ТКС должна охарактеризовать суточный ход температуры земной поверхности (ТЗП), в котором и заключена информация о теплофизических величинах: тепловой инерции, скорости испарения влаги и плотности теплового потока. Далее, решается обратная задача для картографирования теплофизических характеристик земной поверхности (ЗП) (Горный, 2004). Вообще, карты таких характеристик позволяют решать многие практические задачи. При этом чем выше геометрическое разрешение на местности, тем шире круг практических задач, решаемых ТКС. Основная проблема повышения детальности спутникового картографирования теплофизических свойств ЗП связана с необходимостью описания суточного хода ТЗП путем выполнения ТКС в различное время суток (утро, день, вечер, ночь). В настоящее время столь частая ТКС может быть выполнена только съёмочными системами низкого геометрического разрешения, установленными на спутниках серий NOAA (AVHRR) и EOS (Terra, Aqua). Эти спутники могут выполнять ТКС с высокой повторяемостью, но низким разрешением конечных продуктов. Ранее было показано (Горный и др., 2013), что для повышения геометрического разрешения (детальности) итоговых карт целесообразно материалы тепловой космической съемки низкого разрешения комплексировать с картами ТЗП и альбедо поверхности высокого геометрического разрешения на местности, которые получены спутниками Landsat или Terra (ASTER) в видимом и ИК-тепловом диапазонах спектра ЭМВ. Несмотря на это, детальность карт теплофизических характеристик ЗП, построенных с помощью такого комплексирования, не превосходит первых сотен метров, что недостаточно, например, для выявления зон перегрева поверхности городской среды.

В последнее время появились публикации, направленные на повышение детальности спутниковых карт ТЗП, полученных системами низкого геометрического разрешения путем многомерных регрессий со спутниковыми изображениями ЗП высокого геометрического разрешения, которые получены в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра ЭМВ. Это также касается изображений с различными индексами, построенными по результатам спутниковых съемок системами высокого разрешения (Kustas et al., 2003; Agam et al., 2007; Stathopoulou, Cartalis, 2009; Jing, Cheng, 2010; Essa et al., 2013; Wang et al., 2015). В рамках этого направления было достигнуто ~ 4–7-кратное улучшение геометрического разрешения спутниковых карт ТЗП (Wang et al., 2015; Rodriguez-Galiano et al., 2012), что открывает более широкие возможности для практического применения материалов ТКС.

Следует отметить, что эти разработки касаются только карт ТЗП. Для построения карт теплофизических свойств ЗП необходимы дневные, утренние, вечерние и ночные ТКС. С позиции упрощения технологии картографирования теплофизических свойств ЗП по материалам ТКС регрессионный метод целесообразно применять не непосредственно к ТЗП, а к картам теплофизических характеристик ЗП, построенным по данным спутниковых съемок низкого геометрического разрешения. В связи с этим целью настоящей статьи является дальнейшее развитие методики повышения детальности картографирования теплофизического разрешения материалов ТКС низкого геометрического разрешения материалов ТКС низкого геометрического разрешения спутниками серий NOAA и EOS, с материалами спутниковых съемок высокого геометрического разрешения (Landsat, Terra (ASTER).

#### Основные соотношения

Картографирование теплофизических характеристик ЗП в рамках теплоинерционного подхода предусматривает решение обратной задачи в каждой точке (пикселе) итоговой карты на основе использования алгоритма (Горный, 2004), включающего детерминистскую математическую модель суточного хода ТЗП.

Чтобы повысить геометрическое разрешение, используя регрессионный подход, выбиралось статистически представительное число точек («обучающая выборка»), для которых с использованием алгоритма (5 на *рис. 1*) решалась обратная задача, т.е. восстанавливались значения теплофизических характеристик. Далее, строилась регрессионная модель вида:

$$X = F(\mathbf{T}) + \delta; \tag{1}$$

где X – теплофизическая характеристика – регрессор (например: p – тепловая инерция; e – среднесуточная скорость испарения влаги с ЗП;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения; D – коэффициент турбулентного теплообмена (КТТО) ЗП с приземным слоем атмосферы); **T** – вектор исходных данных (предикторов);  $\delta$  – погрешность регрессии. Модель (1) использовалась для картографирования значений X на основе их регрессионных оценок, полученных по известным в каждой точке (пикселе) итоговой карты значениям предикторов. В нашем случае рассматривалась линейная функция F, хотя ее вид может быть любой.

#### Материалы и методы

#### Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана поверхность городской среды (ПГС) Санкт-Петербурга, где имеются контрастные объекты, которые предполагалось использовать для оценки уровня детальности итоговых карт.

#### Материалы спутниковых съемок

Для повышения детальности карт тепловых характеристик ЗП могут быть использованы материалы съемок, выполненных спутниками Landsat и Terra (ASTER). Стандартно пользователи могут получить материалы съемок с этих спутниковых систем высокого разрешения только для утреннего (Landsat) и дневного времени суток (Terra (ASTER) (*maбл. 1*). Даже если имеется возможность заказа и получения материалов вечерних или ночных ТКС, выполненных съемочными системами высокого разрешения, установленными на этих спутниках, из-за 15-дневной повторяемости съемок этими спутниками ТКС не сможет быть выполнена в требуемый короткий промежуток времени (1–3 суток). В результате не будет обеспечено условие полного описания суточного хода температуры дневной поверхности, которое требуется для реализации теплоинерционного подхода. Для исследования возможности повышения детальности карт теплофизических характеристик ЗП были использованы архивные материалы (USGS и NASA) съемки спутников Terra/Aqua (MODIS) и спутника Landsat 8, полученные на территорию Санкт-Петербурга (*табл. 2*).

	Спутник						
Характеристика	NOAA-15	NOAA-16	Terra	Aqua	Landsat	Terra	
Сканер	AVHRR	AVHRR	MODIS	MODIS	<i>TM/</i> <i>ETM+/8</i>	ASTER	
Геометрическое разрешение на местности тепловых каналов, м	1100	1100	1000	1000	120/60/100	90	
Ширина полосы обзора, км	2700	2700	2330	2330	185	60	
Время пересечения экватора, чч : мм	07:00	14:00	10:30	13:30	10:00	10:30	
Повторяемость съемки, суток	0,5	0,5	0,5	0,5	15	15	

Таблица 1. Технические характеристики современных съемочных систем, выполняющих ТКС, определяющие возможность реализации теплоинерционного подхода

## Таблица 2. Спутниковые материалы, использованные в исследовании

No n∕n	Спутник (прибор)	Тип материала	Дата, дд.мм.гггг	Местное время съемки, чч:мм
1	MODIS	Альбедо BDRF	17.05.2014	11:40
2	MODIS	Температура земной	17.05.2014	3:50
3	MODIS	поверхности	17.05.2014	11:40
4	MODIS		17.05.2014	13:15
5	MODIS	Содержание паров воды в столбе атмосферы	17.05.2014	13:15
6	MODIS		17.05.2014	22:55
7	MODIS	Температура земной поверхности	17.05.2014	2:55
8	MODIS		18.05.2014	12:20
9	MODIS		18.05.2014	14:10
10	MODIS		18.05.2014	22:00
11	MODIS		19.05.2014	3:40
12	MODIS		19.05.2014	11:25
13	MODIS		19.05.2014	13:05
14	MODIS		19.05.2014	22:40
15	Landsat 8	Спектральные коэфф. яркости, ТЗП	17.05.2014	12:10

### Технологическая схема обработки информации

Для повышения геометрического разрешения карт теплофизических характеристик ЗП использовалась следующая технологическая схема обработки спутниковых материалов (*puc. 1*):

1. Из архивов https://ladsweb.nascom.nasa.gov были получены стандартные продукты коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) и излучения, альбедо поверхности, восстановленные по материалам съемки спутниками серии EOS (1 на *рис. 1*), нами восстанавливались альбедо поверхности (da Silva et al., 2016).

2. По материалам съемки спутниками серии Landsat 8 с использованием программы MODTRAN нами восстанавливались альбедо поверхности (da Silva et al., 2016) и коэффициенты излучения (Станкевич и др., 2015) (2 на *puc. 1*).

3. Выполнялся выбор точек для «обучающей выборки» (4 на *puc. 1*). Для этого с использованием карты типов застройки территория районировалась по однородным по качеству выделам. Внутри каждого из полученных выделов случайным образом выбирались 50 точек. В каждой точке «обучающей выборки» определялись значения ТЗП, альбедо и КСЯ с карт, построенных по материалам съемки низкого (EOS) геометрического разрешения.

4. К каждой точке «обучающей выборки» применялся алгоритм решения обратной задачи (5 на *рис. 1*), в рамках которого методом градиентного спуска в четырехмерном пространстве решений (тепловая инерция, доля испаряемости<sup>1</sup>, сезонный тепловой поток, КТТО) минимизировалась невязка между результатами спутниковых измерений ТЗП и результатами моделирования суточного (многодневного) хода ТЗП (Горный и др., 1993; Горный, 2004). Моделирование проводилось с использованием данных метеонаблюдений (3 на *рис. 1*) по всему возможному для данной территории диапазону значений альбедо, тепловой инерции, испаряемости, теплового потока, КТТО.

5. По «обучающей выборке» строились регрессионные модели вида (1) картографируемых теплофизических характеристик (регрессоров). Для этого использовались КСЯ, альбедо, коэффициент излучения и ТЗП высокого разрешения в качестве предикторов (7 на *рис. 1*). В результате замены данных низкого разрешения на материалы съемки системой высокого разрешения следовало ожидать появления дополнительных погрешностей картографирования регрессоров, т.к. статистическая модель прикладывалась к более широкому диапазону значений предикторов. Иными словами, имела место экстраполяция модели (1) на диапазон предикторов, более широкий, чем в первоначальной выборке. Предполагалось, что если погрешности модели (1) будут приемлемыми с практических позиций, то детальность картографирования теплофизических характеристик ЗП может быть существенно улучшена.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Под долей испаряемости здесь понимается отношение среднесуточной скорости испарения в исследуемой точке к среднесуточной скорости испарения с открытой водной поверхности, полученных при одинаковых метеоусловиях. Если исследуемая ЗП испаряет меньше, чем открытая водная поверхность, то доля испаряемости меньше единицы. Лесопарковые зоны, как правило, испаряют больше, чем открытая водная поверхность, и доля испаряемости этих зон может быть больше единицы

6. После анализа надежности регрессионных моделей строились карты теплофизических характеристик (9 на *рис. 1 и рис. 3*).

Анализ погрешностей картографирования теплофизических характеристик ЗП выполнялся путем сравнения ТЗП, восстановленной по материалам ТКС высокого разрешения (100 м), и ТЗП, выполненной спутником Landsat 8, с модельной ТЗП на тот же момент времени. Последняя рассчитывалась с использованием детерминистской математической модели суточного хода ТЗП, метеоданных на период ТКС и набора карт теплофизических характеристик, построенных с использованием регрессионной модели (9 на *puc. 1*). Общая абсолютная погрешность включала погрешность решения обратной задачи и погрешность экстраполяции регрессионных моделей на более широкий диапазон предикторов высокого разрешения при построении карт теплофизических характеристик.



Рис. 1. Технологическая схема повышения детальности картографирования теплофизических характеристик ЗП на основе комплексирования материалов низкого и высокого геометрического разрешения

Количественная оценка геометрического разрешения карт теплофизических свойств 3П, полученных методом регрессионных оценок

Для определения геометрического разрешения полученных с применением метода регрессионных оценок карт теплофизических свойств использовалась следующая схема. На основе материалов ближнего ИК-канала, полученных спутником Landsat 8, рассчитывалась серия эталонных изображений – шкал (*puc. 2*) с последовательно ухудшенным геометрическим разрешением на местности: 30 м, 60 м, 90 м, 120 м, 150 м, 180 м, 300 м. Для этого использовалась операция «мозаицирование», снижающая детальность изображения без сглаживания при сохранении размера изображения. Геометрическое разрешение на местности исходной карты составляло 30 м.



Рис. 2. Фрагменты некоторых шкал, использованные для количественной оценки геометрического разрешения полученных карт теплофизических свойств. Цифрами показано геометрическое разрешение каждой из шкал

Карта доли испаряемости (*рис. 3*), как наиболее контрастная из теплофизических характеристик ПГС, последовательно сравнивалась с каждой из шкал. При этом значения доли испаряемости рассматривались в качестве случайных величин ( $\chi$ ), а яркость шкал – как случайные величины ( $\zeta^i$ ), у которых индекс  $i = 1 \div I$  показывал кратность загрубления геометрического разрешения исходного изображения с разрешением 30 м. В качестве количественной меры подобия геометрического разрешения на местности карт доли испаряемости и шкал использовалось количество взаимной информации (mutual information) –  $I(\chi;\varepsilon^i)$ . Количество взаимной информации было выбрано в качестве меры подобия в связи с ее инвариантностью относительно типа статистического распределения (Li, 1990). Количество взаимной информации рассчитывалось по следующей формуле (Li, 1990):

$$I(\chi;\xi^{i}) = -\sum_{j=1+J}\sum_{k=1+K} \{p[\chi_{j}(l,m)]\log_{2} p[\chi_{j}(l,m)] + \log_{2} p[\xi_{k}^{i}(l,m)] / p[\chi_{j}(l,m),\xi_{k}^{i}(l,m)]\},$$
(2)

где l, m – координаты, а именно номера столбцов и рядов для каждого пикселя карты доли испаряемости или шкалы;  $j = 1 \div J$  – уровень дискретного значения доли испаряемости  $\chi$ , диапазон дискретного изменения которой от  $\chi_1(l,m)$  до  $\chi_j(l,m)$ ;  $\xi_k^i(l,m)$  – значение яркости на *i*-ой шкале ( $j = 1 \div K$ );  $\xi^i$ , диапазон дискретного изменения которой от  $\xi_1^i$ до  $\xi_k^i$ ;  $p[\chi_j(l,m)]$  – вероятность того, что на *i*-ой шкале в пикселе с координатами *l* и *m* окажется значение яркости  $\xi_k^i$ ;  $p[\xi_k^i(l,m)]$  – вероятность того, что на карте доли испаряемости в пикселе с координатами *l* и *m* окажется значение доли испаряемости  $\chi_j$ ;  $p[\chi_j(l,m), \xi_k^i(l,m)]$  – условная вероятность того, что на карте доли испаряемости и на *i*-ой шкале в пикселях с координатами *l*, *m* окажутся значения доли испаряемости  $\chi_j$  и яркости шкалы  $\xi_k^i$ .

### Результаты

Визуальное сравнение карты доли испаряемости ЗП, построенной с использованием только материалов низкого разрешения (спутники серии EOS) (*puc. 3a*), и карт, построенных по регрессионным моделям с использованием материалов высокого разрешения (Landsat 8) (*puc 36*), показывает существенное повышение детальности последних. Так, на *puc. 36* отчетливо просматриваются крупнейшие городские магистрали. Ширина этих магистралей составляет 70–100 м. Кроме крупнейших улиц просматривается квартальная застройка, т.е. выделяются площадные объекты, а не только контрастные линейные объекты, которые могут картографироваться и в том случае, если их ширина меньше геометрического разрешения.

В результате визуальный анализ карт, построенных по регрессионным моделям, показал, что достигается результирующее геометрическое разрешение на местности порядка 100–200 м.

#### Обсуждение результатов

Анализ погрешностей картографирования значений доли испаряемости 3П, возникающих при использовании регрессионного метода

На *рис. 4* и в *табл. 3* приведены результаты оценки погрешностей моделирования температуры ПГС на основе подготовленных с применением регрессионных моделей карт теплофизических характеристик высокого разрешения.

Как отмечалось выше, оценка ошибок построения карт теплофизических свойств высокого разрешения была выполнена путем сравнения карт ТЗП, полученных по результатам съемки Санкт-Петербурга спутником Landsat 8, и карт ТЗП, смоделированных на тот же момент времени.



Рис. 3. Карты доли испаряемости Санкт-Петербурга, полученные по материалам съемки 17–19 мая 2014 г. спутниками: А) Низкого разрешения серии EOS; Б) Landsat 8 с применения регрессионной модели (1)

# Таблица 3. Невязки между модельной ТЗП и ТЗП, восстановленной по материалам съемки спутником Landsat 8

Невязки ТЗП	Значение, °С		
Систематическая	0,30		
Среднеквадратическая	1,05		

Таблица 4. Соотношение невязок регрессионных оценок теплофизических характеристик

	Абсолютная невязка			
Картографируемая величина	В единицах физической величины	В энергетических единицах, Вт/м <sup>2</sup>		
Тепловая инерция	289 ЕТИ	7,5		
Доля испаряемости	0,50	20,0		
КТТО	0,92	5,2		
Сезонный тепловой поток	7,5 Вт/м <sup>2</sup>	7,5		



Рис. 4. Карта невязок между восстановленными по данным съемки спутником Landsat 8 и модельными температурами. На врезке приведена гистограмма невязок

Для анализа значимости возникающих при применении регрессионного подхода ошибок восстановления теплофизических характеристик полученные невязки для каждой теплофизической характеристики были представлены в Вт/м<sup>2</sup> (*табл. 4*).

*Таблица 4* показывает, что наибольшие погрешности при применении регрессионного подхода связаны с картографированием доли испаряемости. Это и следовало ожидать, т.к., за исключением пустынных районов, где испарение минимально, затраты тепла на испарение наиболее весомы в тепловом балансе ЗП.

Анализ показывает, что полученные невязки ТЗП (*табл. 3*) лежат в диапазоне погрешностей применяемой нами методики восстановления термодинамической ТЗП с использованием программы MODTRAN по материалам съемки спутником Landsat 8, которые составляют в среднем ~ 0,9 °C, при максимальных значениях – 5,3 °C (Станкевич и др., 2015). Это позволяет сделать вывод о том, что погрешности картографирования значений теплофизических свойств ЗП на основе выражения (1) не препятствуют решению большинства практических задач.

# Количественная оценка геометрического разрешения карт теплофизических характеристик, полученных применением регрессионного подхода

На *рис.* 5 представлены результаты количественной оценки геометрического разрешения построенной регрессионным методом карты доли испаряемости. Отчетливо видно,

что максимум взаимной информации соответствует эталонной шкале с геометрическим разрешением в 90 м. Это в свою очередь соответствует более чем 10-кратному повышению геометрического разрешения по сравнению с картами, полученными только по данным ТКС, выполненной спутниками серии EOS.



Рис. 5. Инструментальная оценка геометрического разрешения карты доли испаряемости. Максимум взаимной информации соответствует геометрическому разрешению на местности в 90 м

#### Выводы

Проведенные исследования позволяют отметить:

1. Геометрическое разрешение на местности карт теплофизических свойств ЗП Санкт-Петербурга, построенных с применением регрессионного подхода при обработке материалов ТКС, полученных спутниками систем EOS и Landsat 8, оценено как 90 *м*, что более чем в 10 раз лучше геометрического разрешения на местности исходных материалов ТКС, полученных спутниками системы EOS, и того же порядка, что и геометрическое разрешение теплового канала спутника Landsat 8 (100 м).

2. Относительные погрешности регрессионных оценок, возникающих при повышении геометрического разрешения карт теплофизических свойств ЗП при комплексировании результатов ТКС системами EOS и Landsat 8, незначительно превышают погрешности, возникающие при восстановлении термодинамической ТЗП по данным съемки спутником Landsat 8. Это открывает возможность для практического использования детальных карт теплофизических свойств ЗП при решении широкого круга практических задач, в том числе для мониторинга эффективности программ энергосбережения и состояния экологической безопасности населения городов. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант №14-05-90416 «Исследование

влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок)».

#### Литература

- 1. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра. 1993. 128 с.
- 2 Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Шилин Б.В. Дистанционный измерительный мониторинг теплопотерь городских и промышленных агломераций (на примере Ст-Петербурга и Хельсинки) // Теплоэффективные технологии. Информационный бюллетень. 1997. № 2. С. 17–23.
- Горный В.И. Космические измерительные методы инфра-красного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Зем-
- ли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 10–16. 4. *Горный В.И., Крицук С.Г.* О возможности картографирования физико-географических зон тепловой космической съемкой // ДАН. Т. 411. № 5. 2006. С. 684-686.
- Горный В.И. Распределение конвективного теплового потока в Беломорском регионе по данным дистан-5 ционного геотермического метода. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата. Ред. Ю.Г. Шварцман, И.Н. Болотов. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.
- Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Количественная оценка перспектив нефтегазонос-6 ности территорий на основе комплексной обработки материалов космических и геофизических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 349-355.
- 7. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографи-Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Термодинамический подход для дистанционного картографи-рования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из кос-моса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
   Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Храмцов В.Н. Верификация крупномасштабных карт термоди-
- намического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
- Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В., Горный В.И., 9 Тронин А.А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки // Український журнал дистан-
- ційного зондування Землі, 2015. № 7. С. 14–23. 10. Agam N., Kustas W.P., Anderson M.C., Li F., Neale C.M. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery // Remote Sens. Environ. 2007. 107. P. 545-558.
- 11. Essa W., van der Kwast J., Verbeiren B., Batelaan O. Downscaling of thermal images over urban areas using the land surface temperature-impervious percentage relationship // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2013. Vol. 23. P. 95-108.
- 12. Jing L., Cheng Q. A technique based on non-linear transform and multivariate analysis to merge thermal infrared data and higher-resolution multispectral data // Int. J. Remote Sens. 2010. Vol. 31. P. 6459-6471.
- 13. Kustas W.P., Norman J.M., Anderson M.C., French A.N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship // Remote Sens. Environ. 2003. Vol. 85. P. 429-440.
- 14. Li W. Mutual Information Functions Versus Correlation Functions // Journal of Statistical Physics. 1990. Vol. 60. Issue 5-6. P. 823-837.
- 15. Rodriguez-Galiano V., Pardo-Iguzquiza E., Sanchez-Castillo M., Chica-Olmo M., Chica- Rivas M. Downscaling Landsat 7 ETM+ thermal imagery using land surface temperature and NDVI images // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2012. Vol. 8. P. 515–527
- 16. da Silva B.B., Braga A.C., Braga C.C., de Oliveira L.M.M., Montenegro S.M.G.L., Barbosa J-r B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2016. V. 20. No 1. P. 3–8.
  17. *Stathopoulou M., Cartalis C.* Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat
- island intensity estimation // Remote Sens. Environ. 2009. Vol. 113. P. 2592-2605.
- 18. Wang F., Qin Zh., Li W., Song C., Karnieli A., Zhao Sh. An Efficient Approach for Pixel Decomposition to Increase the Spatial Resolution of Land Surface Temperature Images from MODIS Thermal Infrared Band Data // Sensors (Basel). 2015. Vol. 15 (1). P. 304-330.
- 19. Watson K., Rowan L.C., Offield T.V. Application of Thermal Modelling in Geologic Interpretation of IR Images // Proceedings of 7-th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. Michigan. 1971. P. 2017-2041.
- 20. Xue Y, Cracknell A.P. Advanced Thermal Inertia Modeling // International Journal of Remote Sensing, 1995. Vol. 16.No. 3. P. 431-446.

# Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface

## S.G. Kritsuk, V.I. Gornyy, I.Sh. Latypov

#### Saint Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS St. Petersburg 197110, Russia E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The aim of the study is to improve the spatial resolution of maps of land surface thermal characteristics (thermal inertia, heat flux, evaporation rate etc.) compiled from satellite imagery. Thermal characteristics of land surface were retrieved from EOS images (spatial resolution ~1000 m) with the help of the deterministic algorithm. Multidimensional statistical regression models were built by using EOS images. Land surface temperature, as well as coefficients of spectral brightness were used as predictors. After that, the model was applied to Landsat 8 images (geometric resolution  $30 \text{ m} \div 100 \text{ m}$ ). The result was more detailed maps of the thermal characteristics of the land surface. The spatial resolution of final maps was assessed by comparison with the images of different spatial resolution of visible spectral band ("scale"). The maxima of mutual information from the map of thermal characteristic and elements of "scale" was used as a measure of agreement. As the result, the spatial resolution of final maps was assessed as 90 m (more than 10 times better than the original EOS images of infrared-thermal spectral band). Errors of thermal characteristic mapping by using this technique were estimated as well. The regression approach opens the possibility to apply EOS satellite infrared thermal imagery to solve ecological safety and energy saving problems of city blocks.

Keywords: satellite, infrared-thermal imagery, land surface, map, thermal characteristics, spatial resolution, regression, resolution increase

*Accepted: 13.10.2016* DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-277-290

#### References

- 1. Gornyy V.I., Shilin B.V., Yasinskii G.I., *Teplovaya aerokosmicheskaya s''emka* (Thermal airborne and satellite flown survey), Moscow, Nedra, 1993, 128 p.
- 2. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Shilin B.V., Distantsionnyi izmeritel'nyi monitoring teplopoter' gorodskikh i promyshlennykh aglomeratsii (na primere St-Peterburga i Khel'sinki) (Remote measuring monitoring of energy loss of urban and industrial areas (by example of Saint-Petersburg and Helsinki), *Teploeffektivnye tekhnologii, Informatsionnyi byulleten'*, 1997, No. 2, pp.17–23.
- Gornyy V.I., Kosmicheskie izmeritel'nye metody infra-krasnogo teplovogo diapazona pri monitoringe potentsial'no opasnykh yavlenii i ob"ektov (Satellite based measuring remote sensing methods of infrared-thermal spectral band wile monitoring natural and technogenic hazardous events), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2004, Issue 1, pp. 10–16.
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., O vozmozhnosti kartografirovaniya fiziko-geograficheskikh zon teplovoi kosmicheskoi s"emkoi, (On possibility to map biomes by satellite based infrared thermal imagery), *DAN*, Vol. 411, No. 5, 2006, pp. 684–686.
   Gornyy V.I., Raspredelenie konvektivnogo teplovogo potoka v Belomorskom regione po dannym distantsionnogo
- Gornyy V.I., Raspredelenie konvektivnogo teplovogo potoka v Belomorskom regione po dannym distantsionnogo geotermicheskogo metoda, (Distribution of convective heat flow in belomorian region according results of remote geothermal method), *Prirodnaya sreda Solovetskogo arkhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata*, Ekaterinburg, UrO RAN, 2007, 184 p.
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Kolichestvennaya otsenka perspektiv neftegazonosnosti territorii na osnove kompleksnoi obrabotki materialov kosmicheskikh i geofizicheskikh s"emok (Quantitative estimation of hydrocarbon resources on the base of complex processing of results of satellite imageries and geophysical surveys), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, Vol. 1, pp. 349–355.
   Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Termodinamicheskii podkhod dlya distantsionnogo kartografirovaniya
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Termodinamicheskii podkhod dlya distantsionnogo kartografirovaniya narushennosti ekosistem, (Thermodynamic approach for remote mapping of ecosystem health disturbance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194.
- 8. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Khramtsov V.N., Verifikatsiya krupnomasshtabnykh kart termodinamicheskogo indeksa narushennosti ekosistem, (Verification of large scale maps of thermodynamic index of ecosystem disturbance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212.
- 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, *Ukrai'ns'kyj zhurnal dystancijnogo zonduvannja Zemli*, 2015, No. 7, pp. 14–23.

- 10. Agam N., Kustas W.P., Anderson M.C., Li F., Neale C.M., A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery, Remote Sens. Environ, 2007, 107, pp. 545-558.
- 11. Essa W., van der Kwast J., Verbeiren B., Batelaan O., Downscaling of thermal images over urban areas using the land surface temperature-impervious percentage relationship, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 2013, Vol. 23, pp. 95-108.
- 12. Jing L., Cheng Q., A technique based on non-linear transform and multivariate analysis to merge thermal infrared data and higher-resolution multispectral data, Int. J. Remote Sens., 2010, Vol. 31, pp. 6459-6471.
- 13. Kustas W.P., Norman J.M., Anderson M.C., French A.N., Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship, Remote Sens. Environ., 2003, Vol. 85, pp. 429–440. Li W., Mutual Information Functions Versus Correlation Functions, *Journal of Statistical Physics*, 1990, Vol. 60,
- 14. Issue 5-6, pp. 823-837
- 15. Rodriguez-Galiano V., Pardo-Iguzquiza E., Sanchez-Castillo M., Chica-Olmo M., Chica- Rivas M., Downscaling Landsat 7 ETM+ thermal imagery using land surface temperature and NDVI images, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, Vol. 18, pp. 515–527. 16. da Silva B.B., Braga A.C., Braga C.C., de Oliveira L.M.M., Montenegro S.M.G.L., Barbosa J-r B., Procedures for
- calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 3-8.
- Stathopoulou M., Cartalis C., Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation, *Remote Sens. Environ.*, 2009, Vol. 113, pp. 2592–2605. 17.
- 18. Wang F., Qin Zh., Li W., Song C., Karnieli A., Zhao Sh. An Efficient Approach for Pixel Decomposition to Increase the Spatial Resolution of Land Surface Temperature Images from MODIS Thermal Infrared Band Data, Sensors (Basel), 2015, Vol. 15 (1), pp. 304–330.
  19. Watson K., Rowan L.C., Offield T.V., Application of Thermal Modelling in Geologic Interpretation of IR Images,
- Proceedings of 7-th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 1971, pp. 2017–2041. Xue Y., Cracknell A.P., Advanced Thermal Inertia Modeling, International Journal of Remote Sensing, Vol. 16,
- 20. No. 3, 1995, pp. 431-446.