Дистанционные методы в изучении коэффициента излучения поверхности по данным многозональной съемки LANDSAT (на примере района Бак Бинь провинции Бинь Тхуан, Вьетнам)

Ле Хунг Чинь¹, Э.А. Терехин², Зань Туен Ву³

¹ Технический институт им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам E-mail: trinhlehung125@gmail.com ² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия, E-mail: terekhin@bsu.edu.ru ³ Ханойский институт природных ресурсов и окружающей среды, Ханой, Вьетнам E-mail: vdtuyen@hunre.edu.vn

Коэффициент излучения является характеристикой поверхности, определяющей ее способность излучать или передавать тепло в процессе излучения. Он может быть измерен наземными методами, например, с помощью стандартного термометра излучения, или на основе данных дистанционного зондирования. В статье представлены результаты определения коэффициента излучения поверхности в районе Бак Бинь, провинции Бинь Тхуан (Вьетнам) на основе нормализованного вегетационного индекса (NDVI) по данным красного (0,63–0,69 мкм) и ближнего ИК (0,77–0,90 мкм) диапазонов многозональной съемки LANDSAT. Исследование выполнено с применением метода, основанного на связи NDVI со значениями коэффициента излучения. Значения NDVI вычислены на основе многозональных снимков LANDSAT, прошедших этап радиометрической и атмосферной корректировки. Путем измерений на 120 участках территории исследования установлены значения вегетационного индекса, характерные для открытой почвы и растительного покрова. На основе полученных материалов проанализирована динамика растительного покрова в период 2002–2014 гг., включая территориальную и временную динамику лесных насаждений. Полученные результаты могут быть использованы для определения температуры земной поверхности, анализа динамики растительного покрова и мониторинга засушливых периодов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, коэффициент излучения поверхности, NDVI, многозональные снимки, LANDSAT

Введение

Коэффициент излучения поверхности (степень черноты) показывает отношение энергии теплового излучения серого тела к излучению абсолютно черного тела при той же температуре. Он является ключевым фактором при определении поверхностной температуры по данным тепловой инфракрасной съемки. Коэффициент излучения может быть определен с помощью стандартного термометра излучения. Однако этот метод может быть эффективно применен только при выполнении исследований преимущественно в лабораторных условиях. В этом плане методы дистанционного зондирования имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. Эти преимущества заключаются в масштабности обзора, возможности получения глобальной и локальной одномоментной информации о природных объектах. Соответствующие возможности спутниковых данных могут быть эффективно использованы для определения коэффициента излучения (Tran et al., 2009; Trinh, 2014), а также для оценки на его основе температуры земной поверхности (Yuan, Bauer, 2007; Lu et al., 2007; Alipour et al., 2008). Для этих целей могут быть использованы снимки как высокого (Sundara et al., 2012), так и среднего пространственного разрешения (Tran, Yasuoka, 2001).

В настоящее время для определения коэффициента излучения поверхности на основе спутниковых данных применяется два основных метода. В первом методе используется

результат классификации объектов на изображении с последующим присвоением каждому объекту конкретных значений коэффициента излучения (Alipour et al., 2008). Во втором методе коэффициент излучения поверхности определяется на основе индекса NDVI (Van de Griend, Owen, 1993; Valor, Caselles, 1996). Первый метод более простой в использовании, но его точность ограничена и находится в зависимости от эффективности результатов классификации снимка. Второй метод имеет более высокую точность и позволяет вычислять коэффициент излучения поверхности по каждому пикселю изображения.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей пространственных распределений коэффициентов излучения ИК диапазона в районе Бак Бинь (провинция Бинь Тхуан, Вьетнам) по данным многозональной съемки LANDSAT на основе индекса NDVI.

Методы исследования

Значение количества приходящего излучения в тепловых инфракрасных диапазонах электромагнитного спектра на спутниковый датчик рассчитывается путем уравнения переноса излучения. Для естественных поверхностей количество приходящего излучения определяется из приближенной формулы (Gillespie et al., 1999):

$$R_{\lambda} = \varepsilon B_{\lambda}, \tag{1}$$

где R_{λ} – количество приходящего излучения от естественных поверхностей на длине волны λ ; B_{λ} – количество приходящего излучения от черного тела в длине волны λ ; ε – коэффициент излучения поверхности.

На основе индекса NDVI коэффициент излучения поверхности можно рассчитать двумя способами, разработанными Van De Griend, Owe M. (Van de Griend, Owen, 1993) и Valor E., Caselles V. (Valor, Caselles, 1996). Нормализированный разностный вегетационный индекс (NDVI) был разработан Rouse B.J. в 1973 г. и вычисляется по стандартной формуле:

$$NDVI = \frac{\rho_{\delta u\kappa} - \rho_{\kappa p}}{\rho_{\delta u\kappa} + \rho_{\kappa p}},\tag{2}$$

где $\rho_{\kappa p}$ – коэффициент отражения в красной спектральной зоне, $\rho_{\delta u \kappa}$ – коэффициент отражения в ближней инфракрасной зоне. В снимках LANDSAT TM, ETM+ красному и инфракрасному диапазонам соответствуют третий и четвертый спектральные каналы, а в изображениях LANDSAT 8 OLI – четвертый и пятый каналы, соответственно.

В методе, разработанном Van De Griend A., Owen M., коэффициент излучения поверхности є определяется на основе его зависимости от индекса NDVI:

$$\varepsilon = 1,0094 + 0,047 \ln(NDVI).$$
 (3)

Этот метод простой, но он может быть эффективно применен для однородных областей с одним типом поверхности (Valor, Caselles, 1996).

Во втором методе, разработанном Valor E., Caselles V., коэффициент излучения є также определяется на основе индекса NDVI, но может применяться для неоднородных областей и различными типами поверхности. В этом методе значения спектрального коэффициента излучения поверхности вычисляются как сумма коэффициентов излучательной способности почвы и растительности:

$$\varepsilon = \varepsilon_{v} P_{v} + \varepsilon_{s} (1 - P_{v}), \tag{4}$$

где ε_{v} , ε_{s} – коэффициенты излучения растительности и почвы; P_{v} – параметр, характеризующий растительность в конкретном пикселе. P_{v} принимает значение 0 для почвы и 1 – для сплошной растительности (Carlson, Ripley, 1996):

$$P_{v} = \left(\frac{NDVI - NDVI_{nove{bl}}}{NDVI_{pacm.} - NDVI_{nove{bl}}}\right)^{2},$$
(5)

где *NDVI*_{почвы}, *NDVI*_{раст.} – значения индекса *NDVI* для почвы и растительности. Исходя из указанных преимуществ, в данной работе был использован метод, разработанный Valor E., Caselles V., для определения коэффициента излучения в районе Бак Бинь, провинции Бинь Тхуан (Вьетнам) по данным многозональной съемки LANDSAT.

Результаты

Исследование проводилось в районе Бак Бинь, провинции Бинь Тхуан – территории, которая является одной из самых засушливых провинций Вьетнама. Среднегодовое количество осадков в ней очень незначительно. В последние годы вследствие изменения климата, а также негативного воздействия от деятельности человека, засухи в Бинь Тхуан происходят более часто не только в сухой сезон, но даже во время сезона дождей, оказывая огромное влияние на производственную деятельность и повседневную жизни людей.

Температура поверхности и растительный покров являются двумя важными факторами при изучении засухи. Для определения поверхностной температуры по данным тепловой ИК съемки LANDSAT необходимо учитывать коэффициент излучения. Таким образом, задача применения данных дистанционного зондирования для определения коэффициента излучения имеет практическое значение.

Исходными данными дистанционного зондирования выступали многозональные изображения, полученные со спутника LANDSAT 7 ETM+ 05.01.2002, 13.01.2005, 12.02.2010 и LANDSAT 8 OLI 15.02.2014 (*puc. 1, табл. 1*). Снимки получены в течение сухого сезона в безоблачную погоду (необходимое условие выполнения съемок). В этот период времени различные виды растительности обладают некоторым постоянством значений коэффициентов спектральной яркости (Марчуков, Чинь, 2011, 2013).

Таблица 1. Многозональные снимки LANDSAT, используем	ные в исследовании
для вычисления коэффициента излучения повер	хности

N₂	Спутник	Спектральные каналы	Длина волны (мкм)	Дата съемки
1	LANDSAT 7	3	0,63 - 0,69	05 01 2002
		4	0,77 - 0,90	03.01.2002
2 LAND	LANDSAT 7	3	0,63 - 0,69	12 01 2005
	LANDSAI /	4	0,77 - 0,90	15.01.2005
3 LANDSA		3	0,63 - 0,69	12 02 2010
	LANDSAI /	4	0,77 - 0,90	12.02.2010
4	LANDSAT 8	4	0,630 - 0,680	15 02 2014
		5	0,845 - 0,885	13.02.2014



Рис. 1. Многозональные снимки Landsat района Бак Бинь, полученные 05.01.2002 (a), 13.01.2005 (б), 12.02.2010 (в) и 15.02.2014 (г), RGB = NIR:RED:GREEN

Снимки LANDSAT, полученные с сайта http://glovis.usgs.gov, прошли радиометрическую и геометрическую коррекцию. На первом этапе предварительной обработки выполнено преобразование яркости значений пикселов в спектральную плотность энергетической яркости [Bt/(м²×ср×мкм)]. Величины спектральной плотности энергетической яркости для изображения LANDSAT 7 ETM+ рассчитаны с использованием модели, разработанной NASA (LANDSAT 7 Science Data User's Handbook):

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{cal\max} - Q_{cal\min}} (Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{\min\lambda}, \tag{6}$$

где L_{λ} – спектральная плотность энергетической яркости [Вт/(м²×ср×мкм)],

 Q_{cal} – яркостное значение пикселя,

 Q_{calmax} – максимальное калиброванное значение пикселя,

 Q_{calmin} – минимальное калиброванное значение пикселя,

 $L_{max\lambda}$, $L_{min\lambda}$ – максимальное и минимальное значения спектральной плотности энергетической яркости используемых сенсоров [Bt/(м²×ср×мкм)].

Для изображения LANDSAT OLI, величина L₂ определена по следующей формуле:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L, \tag{7}$$

где M_L , A_L – мультипликативная и аддитивная калибровочные константы, зависящие от типа сенсора (RADIANCE_MIUL_BAND_x и RADIANCE_ADD_BAND_x, соответственно), Q_{cal} – яркостное значение пикселя (целое число).

Кроме того, была применена атмосферная коррекция на основе метода «вычитания темного объекта» (DOS – Dark Object Subtraction), разработанного Chavez P.S. (Chavez, 1988, 1996), что было необходимо для сопоставления значений NDVI, полученных за разные даты.

Результаты вычисления нормализированного разностного вегетационного индекса (NDVI) для изображений от 05.01.2002, 13.01.2005, 12.02.2010 и 15.02.2014 характеризуют пространственные изменения в растительном покрове территории (*puc. 2a-г*).

На изображениях индекса NDVI яркие пикселы характеризуют густую зеленую растительность, а темные пикселы представляют собой области с отсутствием растительного покрова или разреженной растительностью. Исходя из анализа исходных спутниковых снимков (*puc. 1*) и картограмм вегетационного индекса (*puc. 2*), установлено, что площадь естественных лесов в 2010 и 2014 гг. значительно сократилась по сравнению с 2002 г. При этом на участках Фан Хьеп, Хоа Тханг и Хонг Тхай (в центре района) площадь лесных насаждений выросла.

Для определения коэффициента излучения на основе индекса NDVI необходимо вычислить коэффициенты излучения чистой растительности и открытой почвы. При этом могут быть использованы значения коэффициента излучения чистой растительности и открытой почвы, измеренные в лаборатории. Однако это может привести к ошибкам, обусловленным тем, что на разных участках поверхность обладает различными физическими характеристиками.



Рис. 2. Картограммы значений нормализированного разностного вегетационного индекса (NDVI), полученные на основе снимков Landsat 05.01.2002 (a), 13. 01.2005 (б), 12.02.2010 (в), 15. 02.2014 (г)

В настоящей работе для вычисления значений индекса NDVI были использованы данные с более 120 тестовых участков с открытой почвой или растительным покровом. Вычисленные средние значения индекса NDVI для открытой почвы и чистой растительности оказались соответственно равны 0,127 и 0,515. Коэффициенты излучения чистой растительности и открытой почвы были рассчитаны на основе метода, разработанного Van de Griend (1993) по формуле (3), и их значения, полученные по этому методу равны 0,912 и 0,978 соответственно.

Коэффициент излучения поверхности в итоге был вычислен с помощью метода, разработанного Valor E., Caselles E., на основе уравнения:

$$\varepsilon = \varepsilon_{v}P_{v} + \varepsilon_{s}(1 - P_{v}) = 0,978P_{v} + 0,912(1 - P_{v}) = 0,912 + 0,066P_{v}.$$
(8)

Для вычисления коэффициента излучения поверхности был использован инструмент Modeler в пакете программы ERDAS Imagine 2014. Полученные результаты были обработаны в программном обеспечении ArcGIS для создания и редактирования картограмм коэффициента излучения поверхности. Картограммы коэффициента излучения поверхности в районе Бак Бинь, провинции Бинь Тхуан (Вьетнам), полученные в масштабе 1: 100 000, были созданы, таким образом, на основе снимков LANDSAT на каждую анализируемую дату, 05.01.2002, 13.01.2005, 12.02.2010 и 15.02.2014 (*puc. 3a-г*).



Рис. 3. Картограммы коэффициента излучения поверхности в районе Бак Бинь, провинции Бинь Тхуан (Вьетнам) 05.01.2002 (а), 13.01.2005 (б), 12.02.2010 (в) и 15.02.2014 (г)

Анализ полученных результатов показал, что значения коэффициента излучения поверхности связаны с состоянием растительного покрова и пропорциональны биомассе растительности. Значение коэффициента излучения на участках, покрытых раститель-

ностью, часто достигают величин больше 0,93, особенно на участках густой плотной растительности (естественные леса, лесонасаждения), где могут составлять больше 0,95. Открытая почва, участки для строительства, песчаные поверхности характеризуются более низкими значениями коэффициента излучения, находящимися в диапазоне от 0,91 до 0.92. Для водной поверхности (реки, озера), коэффициент излучения зависит от концентрации хлорофилла в воде. Для воды с низкой концентрацией хлорофилла значение коэффициента излучения составляет около 0,91, а для воды с высокой концентрацией хлорофилла – порядка 0,92.

Анализ территориального распределения коэффициента излучения поверхности показал, что участки с высокими значениями коэффициента излучения находятся на севере района Бак Бинь, в значительной степени покрытого естественным лесом. Высокие значения коэффициента излучения также характерны для участков с лесонасаждениями в центре района Бак Бинь. Т.е. растительный покров существенно влияет на коэффициент излучения поверхности.

Выводы

Коэффициент излучения является важным фактором, на основе которого может быть выполнен анализ растительного покрова и его временной динамики. Данные многозональной съемки LANDSAT с пространственным разрешением 30 м могут быть эффективно использованы для вычисления коэффициента излучения поверхности. Картографирование коэффициента излучения выполнено на основе индекса NDVI, рассчитываемого по коэффициентам отражения красного (0,63–0,69 мкм) и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов (0,77-0,90 мкм). Коэффициент излучения поверхности связан с растительным покровом и достигает более высоких значений в областях с густой растительности, более низких значений – в области открытой почвы или разреженного растительного покрова. На основе экспериментальных исследований вегетационного индекса NDVI на 120 участках и анализа серии снимков LANDSAT выполнены оценки коэффициентов излучения в районе Бак Бинь, провинции Бинь Тхуан и изучена динамика растительного покрова в 2002–2014 гг. Полученные результаты могут быть использованы при определении температуры земной поверхности и для мониторинга засушливых периодов.

Литература

^{1.} Марчуков В.С., Чинь Ле Хунг. Методы выявления динамики тропической растительности Вьетнама путем инарчуков В.С., напозне кунс. ногоды выявления динамики тропи секон растиченыюсти выстнама нутем автоматизированного дешифрирования временных рядов многозональных снимков // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3.С. 75 – 85.
 Марчуков В.С., Чинь Ле Хунг. Мониторинг поверхностной температуры во Вьетнаме по данным многозональной съемки КА LANDSAT // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2013. № 6.

C. 41–43.

- 3. Alipour T., Sarajian M.R. Esmaeily A. Land surface temperature estimation from thermal band of LANDSAT sensor, case study: Alashtar city // The international archives of the Photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2008. Vol. XXXVIII-4/C7. 6 p.
- 4. Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation covers and leaf area index // Remote sensing of Environment. 1997. Vol. 62. P. 241–252.
- Chavez P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data // Remote Sensing of Environment. 1988. Vol. 24. P. 459–479.
- Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. Vol. 62. No. 9. P. 1025–1036.
 Gillespie A.R., Rokugawa S., Hook S.J., Matsunaga T., Kahle A. Temperature/Emissivity separation algorithm
- Gillespie A.R., Rokugawa S., Hook S.J., Matsunaga T., Kahle A. Temperature/Emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4.1999. ATND – AST – 05 – 08. Prepared under NASA contract NAS5 – 31372.
- 8. *Lu Yuan, Tao Heping, Wu Hua*. Dynamic drought monitoring in Guangxi using revised temperature vegetation dryness index // Wuhan University journal of Natural sciences. 2007. Vol. 12. No. 4. P. 663–668.
- Sundara Kumar K., Udaya Bhaskar P., Padmakumari K. Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using LANDSAT ETM+ image // International journal of Engineering Science and technology. 2012. Vol. 4. No. 2. P. 771–778.
- Tran H., Yasuoka Y. MODIS data acquisition, processing and scientific ultilization framework at the Institute of Industrial Science, University of Tokyo // In Proceeding of the 22nd Asian conference on Remote sensing, Singapore. 2001. No. 1. P. 488–492.
- 11. Tran Thi Van, Hoang Thai Lan, Le Van Trung. Thermal remote sensing method in sudy on urban surface temperature distribution // Vietnam Journal of Earth Sciences. 2009. Vol. 31 (02). P. 168–177.
- Trinh Le Hung. Studies of land surface temperature distribution using LANDSAT multispectral image // Vietnam Journal of Earth Sciences. 2014. Vol. 36 (01). P. 82–89.
- 13. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas // Remote sensing of Environment. 1996. Vol. 57. P. 167–184.
- 14. Van de Griend A.A., Owen M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface // International journal of remote sensing. 1993. Vol. 14. P. 1119–1131.
- Yuan F, Bauer M.E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in LANDSAT imagery, Remote sensing of Environment. 2007. Vol. 106. pp. 375–386.

Application of remote sensing in determining land surface emissivity using LANDSAT multispectral imagery (case study: Bac Binh district, Binh Thuan province, Vietnam)

Le Hung Trinh¹, E.A. Terekhin², Danh Tuyen Vu³

¹Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam E-mail: trinhlehung125@gmail.com ²Belgorod National Research University, Belgorod, Russia E-mail: terekhin@bsu.edu.ru ³Hanoi University of Natural resources and Environment, Hanoi, Vietnam E-mail: vdtuyen@hunre.edu.vn

Emissivity is a characteristic of a surface which determines its ability to emit or give off heat by radiation. Land surface emissivity can be determined by standard radiation thermometer or using satellite imagery. This article presents the results of a remote sensing application to determine land surface emissivity in Bac Binh district, Binh Thuan province (Vietnam) based on normalized difference vegetation index (NDVI) using red (0,63–0,69 μ m) and near infrared (0,77–0,90 μ m) channels of LANDSAT multispectral image. The study was performed using a method based on the correlation between NDVI and emissivity coefficient. NDVI values are calculated by using LANDSAT multispectral images after radiometric and atmospheric correction of the data. This study used 120 training samples to calculate NDVI for pure soil and pure vegetation cover areas. On the basis of obtained materials, the vegetation cover dynamics for 2002–2014 was analyzed, including the spatial and temporal dynamics of forest. The results obtained in this study can be used in determining land surface temperature, analyzing vegetation cover dynamics and drought monitoring.

Keywords: remote sensing, land surface emissivity, NDVI, multispectral image, LANDSAT

References

- Marchukov V.S., Trinh Le Hung, Metody vyyavleniya dinamiki tropicheskoy rastitel'nosti V'yetnama putem 1. avtomatizirovannogo deshifrirovaniya vremennykh ryadov mnogozonal'nykh snimkov (The methods of identification of the Vietnamese tropical vegetation dynamics using automated interpretation of the multi-spectral images), Issledovanie Zemli iz Kosmosa, 2011, Vol. 3, pp. 75-85.
- Marchukov V.S., Trinh Le Hung, Monitoring poverkhnostnoy temperatury vo V'yetname po dannym mnogozonal'noy s"yemki KA LANDSAT (Monitoring land surface temperature using LANDSAT thermal infrared image), *Izvestiya Vuzov «Geodesy and Aerophotography»*, 2013, Vol. 6, pp. 41–43. 2.
- Alipour T., Sarajian M.R. Esmaeily A. Land surface temperature estimation from thermal band of LANDSAT 3. sensor, case study: Alashtar city, The international archives of the Photogrammetry, remote sensing and spatial
- *information sciences*, 2008, Vol. XXXVIII-4/C7, 6 p. Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation covers and leaf area index, *Remote sensing of Environment*, 1997, Vol. 62, pp. 241–252. 4.
- Chavez P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral 5. data, Remote Sensing of Environment, 1988, Vol. 2, pp. 459-479.
- Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved, Photogrammetric Engineering and 6.
- *Remote Sensing*, 1996, Vol. 62, No. 9, pp. 1025–1036. Gillespie A.R., Rokugawa S., Hook S.J., Matsunaga T., Kahle A. Temperature/Emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4, 1999, ATND -AST 05 08, Prepared under NASA contract NAS5 31372. 7.
- 8. Lu Yuan, Tao Heping, Wu Hua. Dynamic drought monitoring in Guangxi using revised temperature vegetation dryness index. *Wuhan University journal of Natural sciences*, 2007, Vol. 12, No. 4, pp. 663–668. Sundara Kumar K., Udaya Bhaskar P., Padmakumari K. Estimation of land surface temperature to study urban
- 9. heat island effect using LANDSAT ETM+ image // International journal of Engineering Science and technology, 2012, Vol. 4, No. 2, P. 771–778.
- Tran H., Yasuoka Y. MODIS data acquisition, processing and scientific ultilization framework at the Institute of 10 Industrial Science, University of Tokyo, In Proceeding of the 22nd Asian conference on Remote sensing, Singapore, 2001, Vol. 1, pp. 488-492.
- 11. Tran Thi Van, Hoang Thai Lan, Le Van Trung. Thermal remote sensing method in sudy on urban surface temperature distribution, Vietnam Journal of Earth Sciences, 2009, Vol. 31(02), pp. 168-177.
- 12. Trinh Le Hung. Studies of land surface temperature distribution using LANDSAT multispectral image, Vietnam Journal of Earth Sciences, 2014, Vol. 36(01), pp. 82–89.
- 13. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas, Remote sensing of Environment, 1996, 57, pp. 167–184.
- Van de Griend A.A., Owen M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface, International journal of remote sensing, 1993, Vol. 14, pp. 1119–1131.
- Yuan F., Bauer M. E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as 15 indicators of surface urban heat island effects in LANDSAT imagery, Remote sensing of Environment, 2007, Vol. 106, pp. 375–386.