

Применение тепловых снимков системы ETM+ для изучения теплового острова Москвы

М.Ю. Грищенко

*Географический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
119991, Москва, Ленинские Горы, 1
E-mail: m.gri@mail.ru*

Проблема тепловых островов характерна для всех крупных городов мира. Космические тепловые снимки являются ценным источником информации о его пространственно-временных неоднородностях. Особенno это касается снимков системы ETM+, характеризующихся наилучшим пространственным разрешением среди доступных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне (60 м). В данной работе, на основе 10 снимков системы ETM+, разработана методика картографирования теплового острова города и локальных тепловых аномалий в его пределах. Результатами работы являются две карты, представляющие два варианта классификации тепловых аномалий Москвы. Кроме того, разработана методика получения графика «временного образа» тепловой аномалии – графика изменения относительной интенсивности теплового излучения по сезонам для некоторого объекта. Представленные материалы могут служить ценным источником информации об экологии города и условиях жизни в нем.

Ключевые слова: тепловой остров города, тепловые аномалии, тепловые снимки, сезонная динамика, дешифрирование космических снимков.

Введение

Хотя сам феномен городского «теплового острова», т.е. увеличения температуры воздуха в городе по сравнению с окружающей его местностью, был впервые открыт англичанином Люком Ховардом еще в 1810 году, к исследованиям этого явления в основном приступили в XX веке. К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт изучения данного явления (Weng, 2009). Однако, несмотря на разнообразие методов, применяемых для изучения явления теплового острова, многие особенности его функционирования остаются мало изученными (Voogt et al., 2003).

Данные тепловой инфракрасной съемки применяются в географических исследованиях тепловых островов городов разного пространственного охвата; пространственный охват исследования в целом определяет пространственное разрешение снимка. Так, снимки низкого пространственного разрешения (около 1 км), такие как NOAA/AVHRR и Terra/MODIS, используются в исследованиях широкого пространственного охвата (Cheval et al., 2009; Hung et al., 2006; Pu et al., 2006; Stathopoulou et al., 2009). Преимущество таких материалов в высокой повторяемости съемки, большом количестве съемочных каналов, однако при этом они характеризуются низким пространственным разрешением, недостаточным для изучения пространственных неоднородностей внутри теплового острова. С другой стороны, широкий охват и низкое пространственное разрешение дают возможность проводить исследования не только самого теплового острова города, но и его влияния на окрестности, позволяют оценить общую мощность и протяженность теплового острова (Cheval et al., 2009; Hung et al., 2006). Другой подход представляет использование в исследовании теплового острова снимков более высокого пространственного разрешения, таких как Landsat. Снимки Landsat являются одними из самых распространенных материалов дистанционного зондирования Земли в географических исследованиях среднего масштаба, в том числе это касается и снимков в тепловом инфракрасном диапазоне (Aniello, 1993; Oki et al., 2003; Sobrino et al., 2004; Southworth, 2004). Такие снимки позволяют выявить внутреннюю пространственную структуру тепловых островов городов, проследить развитие во времени и пространстве локальных тепловых аномалий, оценить тепловое влияние различных городских объектов друг на друга. В исследованиях тепловых островов городов снимки Landsat используются как в ка-

честве дополнительного материала (Gluch et al., 2006; Tan et al., 2010; Weng et al., 2004), так и в качестве основного (Aniello, 1993; Sobrino et al., 2004). Известны примеры комплексирования данных теплового диапазона разного пространственного разрешения, полученных с разных спутников (MODIS, ASTER, Landsat) при изучении особенностей теплового острова (Gluch et al., 2006; Pu et al., 2006; Hung et al., 2006).

Важнейшей особенностью материалов съемки со спутников серии Landsat является их доступность. Доступ к снимкам открыт по адресу <http://earthexplorer.usgs.gov/> (ресурс создан Геологической службой США, USGS – United States Geological Survey). Следует отметить, что, среди всех доступных материалов космической съемки в тепловом инфракрасном диапазоне, снимки системы ETM+, установленной на последнем на данный момент (седьмом) спутнике серии Landsat, имеют наилучшее пространственное разрешение – 60 м.

Именно такие снимки использованы в нашей работе в качестве исходных материалов.

Материалы и методика

Основной целью работы является выявление, исследование и картографирование пространственно-временных особенностей «теплового острова» Москвы на основе географического дешифрирования.

Определены основные задачи, которые необходимо решить в рамках данной работы для полноценного и всестороннего исследования «теплового острова»:

1. Изучение сезонной динамики тепловых аномалий Москвы по разносезонным снимкам Landsat в тепловом инфракрасном диапазоне.
2. Детальное исследование пространственно-временной динамики тепловых аномалий Москвы на примере Северо-Западного административного округа.
3. Оценка влияния «теплового острова» Москвы на различные типы объектов на основе сравнения фрагментов снимка на территорию Москвы и запада Московской области.

Кроме того, важной задачей является разработка методики анализа многовременного теплового снимка Landsat-7.

В качестве исходных материалов было отобрано 10 разновременных снимков Landsat-7, из которых затем были выделены рабочие области. В качестве рабочих областей выбраны две: первая охватывает территорию Москвы, вторая – участок на западе Московской области (рис. 1). Эта территория использовалась для сравнения тепловых характеристик в городе и в пригородной зоне. Для уменьшения стороннего влияния теплового острова Москвы был выбран участок со стороны, наветренной для господствующих в данных широтах западных ветров, с городами Звенигород, Одинцово, Дедовск, Истра, Зеленоград (Красногорский, Истринский, Солнечногорский, Одинцовский районы).

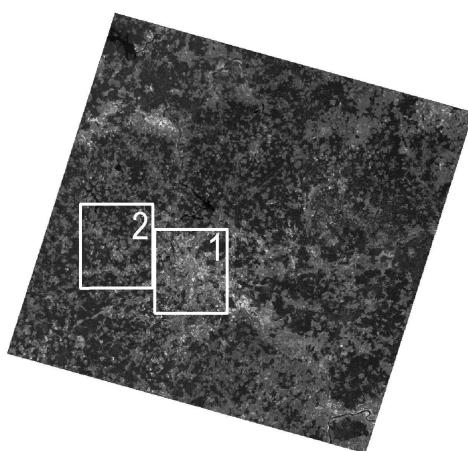


Рис. 1. Рабочие области на тепловом снимке системы ETM+ за 26 мая 2003 г.

Важным этапом работы был анализ статистических характеристик всех выбранных фрагментов, в результате которого выявлено, что вид распределения пикселов по уровням яркости и положение максимума гистограммы существенно меняются в зависимости от сезона. Выявлено, что коэффициент корреляции между значениями яркости максимумов гистограмм и значениями температуры воздуха в день съемки равен 0,98. Это позволяет сделать вывод о том, что сезонные колебания теплового поля Москвы отражены на тепловых снимках достаточно объективно.

Для получения наглядной картины распределения теплового излучения и обеспечения сопоставимости разносезонных снимков было проведено квантование выделенных фрагментов снимков по ступеням яркости. Для оценки изменения теплового излучения городских объектов между сезонами были также построены синтезированные изображения, составленные из пар снимков. Это позволило провести классификацию тепловых аномалий на основе особенностей их сезонной динамики, в результате чего выявлено соответствие между сезонной динамикой теплового излучения и типами территории.

Детальный анализ пространственно-временной динамики тепловых аномалий проведен на примере Северо-Западного административного округа Москвы с использованием официальной Схемы функционального зонирования территории (<http://gpinfo.mka.mos.ru/>). Детальные характеристики объектов по возможности получены с привлечением данных дистанционного зондирования сверхвысокого пространственного разрешения и других источников.

В целях изучения влияния «теплового острова» на различные объекты проведено сравнение статистических характеристик фрагментов снимков на территорию Москвы и запада Московской области.

Результаты и выводы

Результаты сопоставительной обработки квантованных изображений позволили классифицировать все городские объекты на 4 класса и 11 подклассов сезонной динамики теплового излучения. Каждый график для группы объектов характеризует тот или иной тип динамики. Все типы и подтипы сезонной динамики теплового излучения (или тепловые зоны и подзоны) были нанесены на карту (рис. 2), которая дает возможность анализировать пространственное распределение групп объектов с различной сезонной динамикой теплового излучения (Балдина, Грищенко, 2011). Тепловые зоны, соответствующие 4 типам сезонной динамики теплового излучения, в значительной степени соответствуют зонам функционального зонирования (жилой, промышленной, природных территорий), однако так называемы «подзоны», выделенные в пределах зон, несут много дополнительной информации. Так, например, среди промышленных объектов выделено три типа динамики интенсивности теплового излучения. Водные объекты достаточно четко разделяются на подверженные интенсивному загрязнению и менее загрязненные.

По результатам детального анализа пространственно-временной динамики тепловых аномалий составлена карта тепловых аномалий СЗАО (рис. 3). На карте показаны основные тепловые аномалии, определяющие эффект «теплового острова» на территории СЗАО Москвы (Лабутина и др., 2012). На этой карте представлена иная классификация тепловых аномалий, по сравнению с картой тепловых зон. Здесь в основу классификации положена устойчивость тепловых аномалий во времени и пространстве, а также их отклонения от фона, за который принят уровень интенсивности теплового излучения жилых кварталов. Таким образом, можно выделить тепловые аномалии, вносящие наибольший вклад в формирование теплового острова на данной территории, а также тепловые аномалии, имеющие решающее значение для ослабления этого явления.

ТЕПЛОВЫЕ ЗОНЫ МОСКВЫ

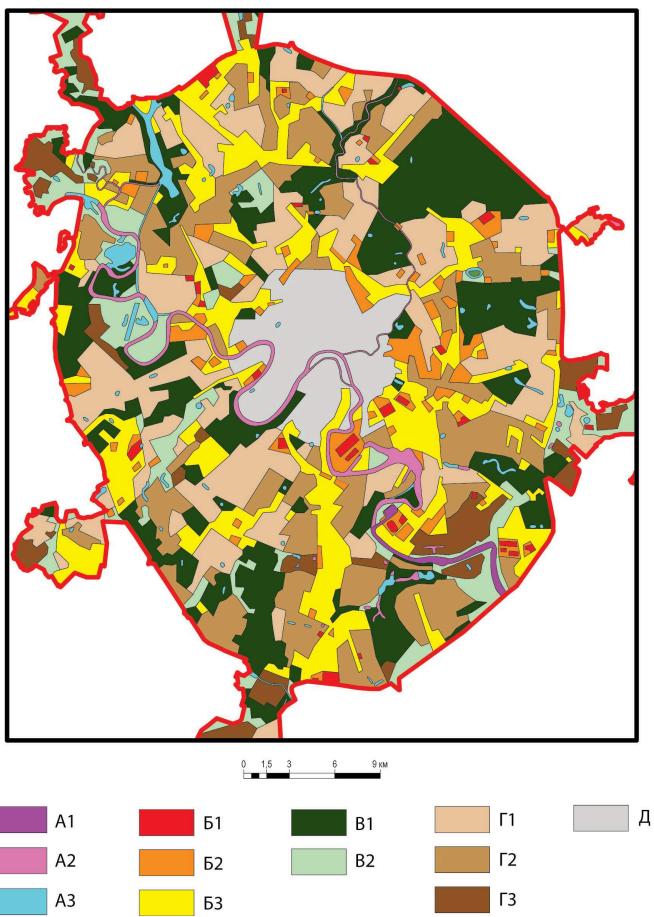


Рис. 2. Карта "тепловых зон" Москвы. «Тепловые подзоны»: А1 – «сильнозагрязненные водные объекты»; А2 – «среднезагрязненные водные объекты»; А3 – «слабозагрязненные водные объекты»; Б1 – «промышленные зоны высокой активности»; Б2 – «промышленные зоны средней активности»; Б3 – «промышленные зоны слабой активности»; В1 – «лесные и парковые массивы»; В2 – «луга, пустыри и прочие безлесные тер-ритории»; Г1 – «жилая застройка с высокой степенью озеленения»; Г2 – «жилая застройка со средней степе-ниью озеленения»; Г3 – «жилая застройка с низкой степенью озеленения»; Д - зона центра Москвы, где разрешения теплового канала недостаточно для характеристики объектов

При анализе статистических характеристик фрагментов снимков на территорию Москвы и запада Московской области выявлено, что форма гистограмм фрагментов снимков на территорию запада Московской области существенно отличается от формы гистограмм фрагментов снимков на территорию Москвы. Как показал анализ фрагментов снимков, тепловой остров оказывает схожее воздействие на объекты всех типов (промышленные, леса, безлесные пространства), что выражается в повышении яркости пикселов, соответствующих таким объектам, находящимся на территории Москвы, по сравнению с аналогичными объектами на западе Московской области.

Отметим основные выводы, которые позволяет сделать проведенное исследование, а также основные результаты:

1. «Тепловой остров» является самостоятельным географическим объектом, функционирующим как система составляющих его локальных тепловых аномалий. При этом географические объекты любого типа и иерархического уровня характеризуются индивидуальной картиной распределения тепловых контрастов для каждого сезона.
2. Разработана методика анализа и обработки многовременного космического снимка в тепловом инфракрасном диапазоне. Описан метод получения «временного образа» тепловой аномалии – графика изменения интенсивности теплового излучения данного объекта (участка местности) по отношению к соседним объектам (всем объек-

там рассматриваемой территории). Разработана также методика обработки и анализа влияния «теплового острова» на основе сопоставления гистограмм распределения пикселов по уровням яркости фрагментов многовременного теплового снимка на территорию города и его пригорода и сравнения значений яркостей тепловых аномалий различных видов на этих фрагментах.

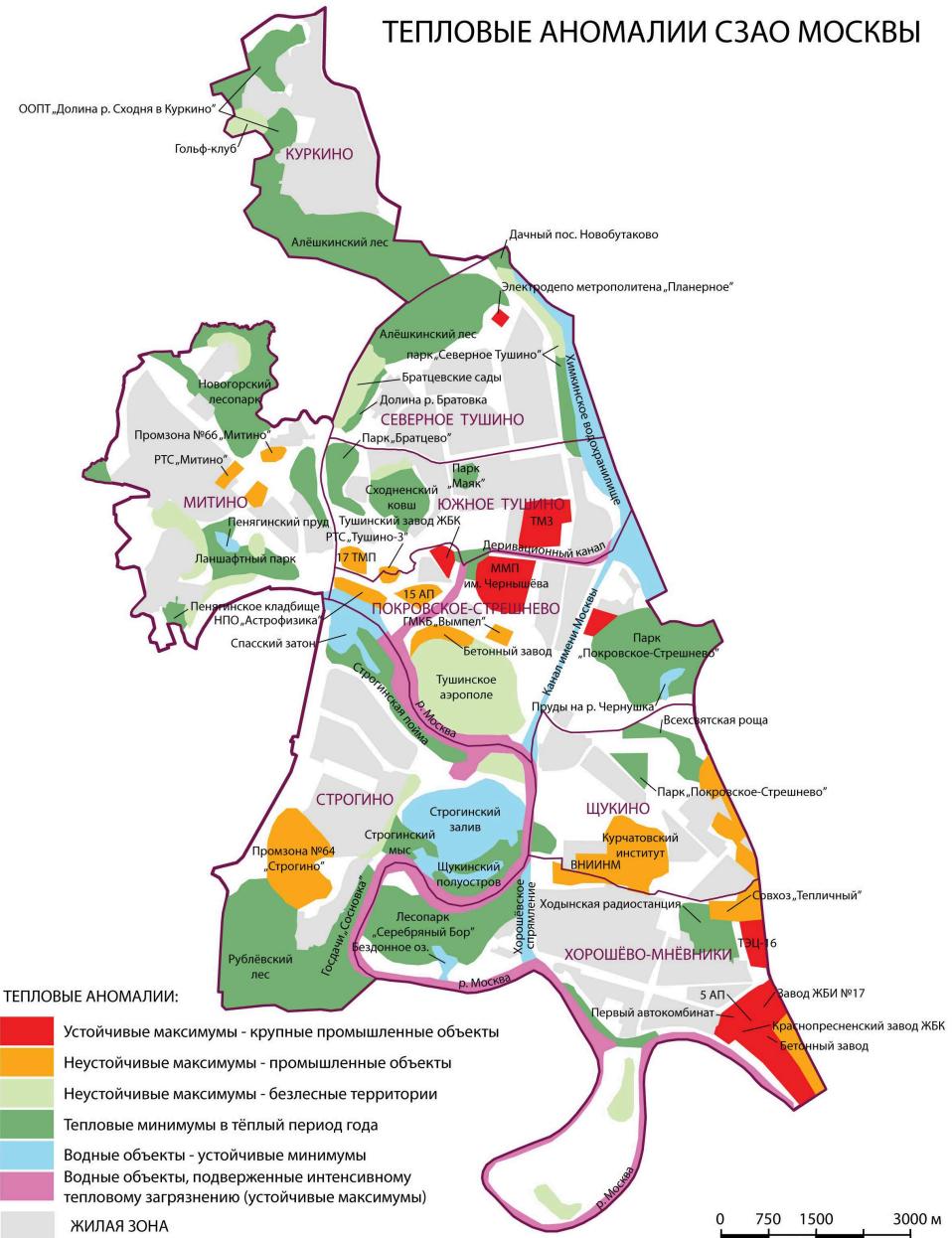


Рис. 3. Карта тепловых аномалий Северо-Западного административного округа Москвы

3. Анализ разносезонных снимков позволяет не только выделить основные тепловые аномалии, как положительные, так и отрицательные (тепловые максимумы и тепловые минимумы), но и оценить их устойчивость во времени и пространстве.
4. Объектами, оказывающими наиболее сильное влияние на формирование «теплового острова», являются промышленные зоны и лесные массивы. При этом промышленные зоны являются мощными тепловыми максимумами, формируя локальные положительные тепловые аномалии, в то время как лесные и парковые массивы в теплый период года оказывают мощное смягчающее воздействие, формируя значительные тепловые минимумы.

5. Важным является также вывод о применимости данных Landsat-7 для изучения «теплового острова» города и локальных тепловых аномалий. Разновременные снимки Landsat-7 теплового ИК-диапазона обеспечивают исследование и картографирование пространственно-временной динамики теплового излучения природных и антропогенных объектов на уровне как крупного мегаполиса в целом, так и его отдельных частей. При этом пространственное разрешение космических снимков системы ETM+ (60 м) позволяет дешифрировать только такие здания, размеры которых в горизонтальном сечении больше, чем 60×60 м. Такими зданиями являются многие промышленные объекты, однако подавляющее большинство жилых зданий при таком разрешении отражено не будет. При этом снимки Landsat-7 дают возможность выделять зоны со схожими характеристиками теплового излучения, т.е. снимки данного сенсора являются весьма ценным источником тепловых инфракрасных данных на масштабном уровне городских кварталов.

Представленные материалы могут служить ценным источником информации для изучения «теплового острова» города, экологии города, условий жизни в различных его районах, а также как основа для изучения микроклимата города с последующим применением выявленных закономерностей в строительстве новых кварталов и реконструкции старых с целью улучшения условий жизни в них.

Литература

1. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat-7/ETM+ // Геоинформатика. №3. 2011. С. 62–70.
2. Лабутина И.А., Балдина Е.А., Грищенко М.Ю., Хайбрахманов Т.С. Опыт использования космических снимков при экологических исследованиях территории Москвы // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2012. Выпуск 12. С. 50–55.
3. Aniello C.A. Using Landsat-TM thermal data to map micro-urban heat islands in Dallas, Texas. Submitted to the Graduate Faculty of AddRan College of Arts and Sciences Texas Christian University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, December 1993.
4. Cheval S., Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from modis images // Theoretical and Applied Climatology. 2009. №96. P. 145–153.
5. Gluch R., Quattrochi D.A., Luwall J.C. A multi-scale approach to urban thermal analysis // Remote Sensing of Environment. 2006. №104. P. 123–132.
6. Hung T., Uchihama D., Ochi S., Yasuoka Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2006. №8. P. 34–48.
7. Oki K., Omasa K. A Technique for Mapping Thermal Infrared Radiation Variation Within Land Cover // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. №6. P. 1521–1524.
8. Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval // Remote Sensing of Environment. 2006. №104. P. 211–225.
9. Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat-5/TM // Remote Sensing of Environment. 2004. №90. P. 434–440.
10. Southworth J. An assessment of Landsat TM band 6 thermal data for analyzing land cover in tropical dry forest regions // International Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25. №4. P. 689–706.
11. Stathopoulou M., Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation // Remote Sensing of Environment. 2009. №113. P. 2592–2605.
12. Tan K.C., Lim H.S., MatJafri M.Z., Abdullah K. Landsat data to evaluate urban expansion and determine land use/land cover changes in Penang Island, Malaysia // Environmental Earth Sciences. 2010. №60. P. 1509–1521.
13. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sensing of Environment. 2003. №86. P. 370–384.

14. *Weng Q.* Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. №64. P. 335–344.
15. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sensing of Environment. 2004. №89. P.467–483.

ETM+ thermal infrared imagery application for Moscow urban heat island study

M.Y. Grishchenko

*Faculty of Geography of M.V. Lomonosov Moscow State University
119991, Leninskiye Gory 1, Moscow, Russia
E-mail: m.gri@mail.ru*

Urban heat island is a phenomenon related to all big cities of the world. Spatial thermal infrared imagery is an important source of information about its variations in time and space. It specially concerns ETM+ imagery which is characterized by the best spatial resolution among all accessible spatial thermal infrared imagery – 60 meters. In our study, we developed the urban heat island and its local thermal anomalies mapping technique based on 10 ETM+ images. The result of our study is two maps which represent two different versions of Moscow thermal anomalies classification. The technique of thermal anomalies' temporal signatures revealing is developed as well. Temporal signature is a diagram representing relative thermal emission seasonal changes for an object in a city. Presented materials are able to become a source of information about city environment and living conditions in it.

Keywords: urban heat island, thermal anomalies, thermal infrared imagery, seasonal changes, imagery interpretation.