



Рис. 7. Фрагмент интерфейса сервиса arcgis online

Авторы видят очевидную тенденцию роста числа базовых подложек. При этом смешение жанров использования карт (сторителлинг, ГИС, геопорталы) формирует новое направление запросов пользователей к нюансным различиям базовой карты. В то же время массовые сервисы скорее тяготеют к конечному числу вариантов, предоставляя пользователям возможность самостоятельной манипуляции над подложкой.

Вероятно, в будущем нас может ожидать создание свода автоматических методов правки, формирующих по запросу пользователя определенный тип карты-основы, что подтверждается технологиями перехода к векторным веб-картам, с динамическим рендерингом и формированием карт «на лету».

Библиографический список

1. Воронина М.В., Зайченко С.А., Зыкова Е.Ф. Семиотические особенности представления информации на веб-картах. ИнтерКарто/ИнтерГИС-16. Устойчивое развитие территорий: теория и ГИС и практический опыт: Материалы Международной научной конференции (Ростов-на-Дону (Россия), Зальцбург (Австрия), 3 – 4 июля 2010 г.). – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2010. С. 486 – 490.
2. Zaychenko S., Voronina M., Zyкова E., Design of the base world map for online-mapping service. Proceedings of the 25th International Cartographic Conference. Paris, 3–8 July 2011. Режим доступа: http://icaci.org/documents/ICC_proceedings/ICC2011/

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА

М.Ю. Грищенко

МГУ им. М.В.Ломоносова, географический факультет
Москва, Россия, m.gri@mail.ru

URBAN HEAT ISLAND AEROSPACE STUDIES

Grishchenko M.Y.

M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
Moscow, Russia, m.gri@mail.ru

Abstract. Modern cities are characterized by special urban landscape and special urban climate. Urban heat island is a phenomenon closely associated with urban territories. There are many methods developed for studying urban

heat island, they can be combined into two groups: imagery-based methods and physicomathematical methods. Using spatial imagery can provide revealing thermal anomalies evolution in time and space, spatial distribution of various thermal anomalies, differences in quantitative measures of various thermal anomalies. Despite the fact that imagery-based methods are seemed to be very widespread among scientists all over the world, still there are some problems with using spatial imagery. The best spatial resolution of accessible thermal imagery is 60 m (ETM+ sensor), and sometimes it is not enough for urban studies (many urban objects have smaller dimensions). The problem of urban heat island is rather serious in modern world, and it needs data of very good quality.

Введение.

Современные города оказывают значительное воздействие на природную среду, внутри них формируется особый городской ландшафт и особый городской микроклимат [Мягков и др., 2007]. Отличительной чертой городского микроклимата является формирование так называемого «теплового острова» (или «острова тепла»), в англоязычных источниках – urban heat island (UHI), т.е. явления увеличения температуры воздуха в городе по сравнению с окружающей его местностью.

Хотя сам феномен городского «теплового острова» был впервые открыт англичанином Люком Ховардом (Luke Howard) ещё в начале XIX века [Локощенко, 2011], к исследованиям «теплового острова» города в основном приступили во второй половине XX века. К настоящему времени накоплен достаточно большой объём научных исследований, касающихся тех или иных сторон данного явления. Так, например, изучается суточная динамика теплового поля города; связь пространственно-временной динамики локальных тепловых аномалий города с особенностями использования земель; взаимосвязи изменений температуры воздуха и температуры поверхности в пределах города; проводится моделирование «теплового острова» города, как температур поверхности, так и температур воздуха; моделирование энергетического баланса города; проводится сопоставление городских температур с температурами окружающей местности; изучение различий в интенсивности теплового излучения городских объектов в дневное и ночное время; использование вегетационных индексов, в том числе, NDVI, для изучения «теплового острова» города; изучение взаимосвязей между интенсивностью теплового излучения, NDVI и особенностями использования земель и мн. др., во многих работах основным источником информации являются данные космической съёмки в тепловом инфракрасном диапазоне [Voogt et al., 2003; Weng et al., 2006; Weng, 2009]. В русскоязычной научной литературе вопросам исследования особенностей и свойств данного феномена уделяется существенно меньшее внимание, чем в англоязычной, что и послужило поводом для настоящего обзора.

Значение тепловых снимков для изучения «теплового острова» города.

Весьма ценным материалом для изучения пространственных особенностей «теплового острова» города стали изображения Земли в тепловом инфракрасном диапазоне (или, кратко, - тепловые снимки). Они обладают некоторыми замечательными особенностями, которые позволяют выделить их среди данных дистанционного зондирования других типов. Так, на тепловых снимках отображается интенсивность теплового излучения, данные о пространственном распределении которого крайне сложно получить иным образом. Отсюда следует, что, благодаря снимкам в тепловом инфракрасном диапазоне, мы можем получить информацию о таких свойствах природных и антропогенных объектов, которые оказываются скрытыми при использовании данных дистанционного зондирования других типов. Нельзя не отметить, что использование тепловых инфракрасных изображений позволяет наблюдать объекты земной поверхности при отсутствии солнечного света (т.е. ночью), что даёт возможность изучения внутрисуточной динамики теплового излучения. Использование разносезонных тепловых снимков открывает путь к изучению сезонной динамики теплового излучения земной поверхности. Наличие обширных архивов тепловых снимков позволяет исследовать многолетнюю динамику теплового излучения различных объектов. Современные съёмочные системы получают тепловые снимки разного пространственногоразрешения и разного пространственного охвата, что открывает путь к изучению теплового излучения на разных масштабных уровнях. Особенности внутрисуточной, сезонной и многолетней динамики «теплового острова» являются одними из наиболее сложных сторон этого явления. Изучение пространственно-временной динамики «теплового острова» города даёт возможность определить причины возникновения этого явления, его влияние на городские объекты, а также механизмы, позволяющие свести это влияние к минимуму.

Изучением «теплового острова» активно занимаются исследователи разных стран Европы, Америки, Азии. Не исключением является и Россия. Однако среди отечественных исследователей направление изучения «теплового острова» не является широко распространённым, по сравнению со многими их зарубежными коллегами. Конечно, нельзя не отметить тот факт, что проблема «тепловых островов» особенно актуальна для стран с более тёплым климатом, нежели Россия. Однако, несмотря на это, в зарубежных работах нередко можно встретить примеры изучения «тепловых островов» городов с климатом, близким к климату средней полосы России, а также рекомендации по изучению «тепловых островов» таких городов (например, Париж, Монреаль) [Cantat, 2004; Anquez et al, 2011].

В то время как за рубежом тепловые снимки (в первую очередь, систем TM/Landsat и ETM+/Landsat) являются основным материалом для изучения пространственных особенностей «теплового острова» города, в отечественных исследованиях преобладает подход, основанный на построении математических моделей с использованием метеорологических показателей. «Тепловой остров» города чаще всего определяется как объект изучения климатологов [Lokoshchenko et al., 2003; Константинов, 2011; Кораблёва и др., 2010]. Этот подход широко развит и за рубежом [Atkinson, 2003], но там ему не отдаётся абсолютного предпочтения.

Работы, в основу которых положен «климатологический» подход, посвящены анализу пространственно-временной динамики параметров атмосферы на территории города, в них разрабатываются математические модели для описания микроклимата города, а также проводится оценка интенсивности «теплового острова» города в разные сезоны года (на основе метеоданных). При этом в качестве исходных данных часто используются метеорологические показатели, получаемые на метеостанциях, сеть которых недостаточно густа, кроме того, такие данные не всегда являются репрезентативными (предпочтительны данные полевых измерений, но получить их не всегда просто). За рубежом такой подход также развит весьма широко, но использование тепловых снимков и методов их обработки в изучении явления «теплового острова» города отнюдь не отодвинуто на второй план, наоборот, им уделяется весьма существенное значение [Voogt et al., 2003; Weng et al., 2006; Weng, 2009].

Данные тепловой инфракрасной съёмки применяются в географических исследованиях пространственных особенностей «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 съёмки, большом количестве съёмочных каналов, однако при этом они характеризуются низким пространственным разрешением, недостаточным для изучения пространственных неоднородностей внутри «теплового острова» города. 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 протяжённость такого «теплового острова» [Cheval et al., 2009; Hung et al., 2006]. Другой подход представляет использование в исследовании пространственных особенностей «теплового острова» города снимков более высокого пространственного разрешения, таких как ASTER, TM и ETM+/Landsat. Снимки со спутников Landsat являются одними из самых распространённых материалов дистанционного зондирования Земли в географических исследованиях среднего масштаба. 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 пространственных особенностей «тепловых островов» городов снимки со спутников Landsat используются как в качестве 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]. При изучении пространственных особенностей «теплового острова» известны примеры комплексирования данных теплового диапазона высокого и низкого разрешения, полученных с разных спутников (MODIS, ASTER, Landsat) [Gluch et al., 2006; Ramachandra, 2010; Pu et al., 2006; Hung et al., 2006]. Совместное применение данных разного пространственного разрешения особенно ценно тем, что даёт возможность использовать преимущества как снимков большого охвата, так и снимков высокого разрешения. Среди результатов таких работ обычно присутствуют рекомендации по использованию снимков того или иного разрешения для изучения «теплового острова» города на разных пространственных уровнях [Gluch et al., 2006].

Следует отметить, что, несмотря на очевидную важность изучения проблемы «тепловых островов» городов и ценность тепловых снимков как источников информации об этом явлении, прогресс в технологиях получения изображений такого типа в последнее время не слишком заметен. Наилучшее доступное пространственное разрешение таких снимков составляет 60 м (съёмочная система ETM+/Landsat-7), но в настоящее время эти снимки имеют пропуски данных в виде полос (в связи с аварией съёмочного оборудования), что существенно снижает их качество. Существенных изменений не произойдёт и с запуском нового спутника серии Landsat – LCDM (Landsat Data Continuity Mission), на котором будет работать два вида аппаратуры - Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Аппаратура OLI настроена на получение снимков в 8 каналах видимого, ближнего инфракрасного и среднего инфракрасного диапазонов спектра с пространственным разрешением 30 м, а также в панхроматическом диапазоне с пространственным разрешением 15 м. Аппаратура TIRS будет получать снимки в двух каналах теплового инфракрасного диапазона (10,6 – 11,2 мкм и 11,5 – 12,5 мкм) с пространственным разрешением лишь 100 м. В настоящее время запуск LCDM запланирован на февраль 2013 года.

Основные направления исследования «теплового острова» города.

За рубежом проблему «теплового острова» исследуют достаточно глубоко, она проникает в различные области наук о Земле, в том числе и в сравнительно мало распространённые, как, например, медико-географические исследования [Johnson et al., 2009]; проводятся исследования по сравнению «островов тепла» городов, расположенных в различных климатических условиях [Imhoff et al., 2010] и мн. др.

Один из подходов к изучению пространственных особенностей «теплового острова» города – различные виды классификаций по данным дистанционного зондирования в тепловом ИК-диапазоне [Aniello, 1993; Tan et al., 2010; Zhu et al., 2002]. Как правило, такие методы применяют для исследования «использования земель» и создания «карт земных покровов» (land cover/land use). Чаще всего к исследованиям land cover/land use привлекают снимки в разных спектральных диапазонах, одним из которых является тепловой. Изучается

связь между типами «использования земель» и тепловыми аномалиями [Gluch et al., 2006; Oki et al., 2003; Cheval et al., 2009; Stathopoulou et al., 2007], на основе многозональных данных создаются карты land cover/land use [Doussset et al., 2003]. Неоднократно указывается на существование взаимосвязи между структурой УН и характеристиками land cover/land use, а также на возможность использования тепловых снимков как надёжного источника информации для получения информации об «использовании земель» [Cheval et al., 2009; Stathopoulou et al., 2007].

Значительную часть научных работ по теме исследования «теплого острова» города занимают различные варианты моделирования тепловых характеристик поверхности и извлечения параметров теплового излучения. Одна из наиболее часто поднимаемых проблем – извлечение из тепловых снимков «температур земной поверхности» - land surface temperatures (LST), т.е. восстановление абсолютных температур [Zhang et al., 2006; Suga et al., 2003; Sobrino et al., 2004; Srivastava et al., 2009]. Тепловые сенсоры регистрируют интенсивность теплового излучения, зависящую от температуры излучающего тела, преобразуя её в яркость на снимке. Интенсивность теплового излучения зависит от температуры излучающего тела. Однако при съёмке из космоса возникают нарушения зависимости «интенсивность теплового излучения – температура излучающего тела», которые связаны главным образом с влиянием атмосферы [Горный и др., 1993; Poglio et al., 2006]. Без учёта всех параметров атмосферы, оказывающих влияние на отображение различных по интенсивности теплового излучения объектов (вертикальных профилей температуры и влажности в точках зондирования), получить точные значения LST невозможно.

Решить эту проблему позволяет использование для извлечения LST алгоритмов «расщеплённого окна прозрачности» (split-window method – SWM) [Pu et al., 2006; Поляков и др., 2010; Zhu et al., 2002], которые заключаются в использовании для извлечения LST снимков нескольких тепловых каналов (например, при использовании многозональных данных таких съёмочных систем, как AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и ASTER/Terra). Что касается съёмочных систем TM и ETM+, то здесь такой возможности нет в силу наличия у них только одного теплового канала. В связи с этим, если имеется достаточно большое количество алгоритмов извлечения LST, например, со снимков ASTER [Pu et al., 2006], то вариантов алгоритмов извлечения LST со снимков Landsat ещё больше [Suga et al., 2003; Sobrino et al., 2004; Yang et al., 2004; Weng et al., 2004]. Все эти алгоритмы дают только приближённые результаты, для повышения их качества необходимо знать параметры атмосферы [Tan et al., 2010; Поляков и др., 2010]. Но учесть все эти параметры крайне сложно (а практически – невозможно), поэтому проблему стараются обойти каким-либо образом. Например, точность алгоритма извлечения LST может быть оценена при сравнении с данными наземных наблюдений [Suga et al., 2003; Sobrino et al., 2004; Yang et al., 2004]; вариант с наименьшей разницей выбирают в качестве рабочего. Но наземные наблюдения должны быть тщательно спланированы, иначе их объективность как средства проверки достоверности алгоритмов может оказаться под вопросом. Так, при использовании в качестве наземных данных измерений метеорологических параметров на метеостанциях следует учитывать их «микrokлиматическое положение» - часто метеостанции на территории города расположены в парках – локальных «островах прохлады» города [Peterson, 2003; Cantat, 2004].

В тех работах, где извлечение LST является не целью, а средством для получения какого-либо результата, получаемые приближённые значения температуры принимают за истинные, хотя их отличия от истинных могут составлять несколько градусов [Suga et al., 2003]. Использование авиационных сенсоров позволяет избавиться от необходимости учёта вертикальных профилей температуры и влажности, а также даёт возможность изучить зависимость теплового излучения от угла обзора съёмочной системой излучающего объекта [Lagouarde et al., 2004].

Много внимания обращено на изучение связи мощности растительного покрова и интенсивности теплового излучения – при сравнении двух таких изображений всегда обнаруживается ярко выраженная обратная связь. Эту связь оценивают чаще всего через анализ изображений LST и NDVI [Pu et al., 2006; Tan et al., 2010]. Использование NDVI совместно с LST позволяет получить дополнительную информацию о поверхности Земли, такую как суммарное испарение и влажность почвы (особенно это касается территорий с разреженным растительным покровом). Результаты совместного анализа изображений LST и NDVI часто используются для оценки воздействия урбанизации [Weng, 2009], а совместное использование LST, NDVI и карт land cover/land use даёт наиболее полную картину [Tan et al., 2010]. Однако нередко указывается на недостаточную эффективность NDVI как средства оценки мощности растительного покрова в городе. Предлагаются другие методы оценки воздействия урбанизации, например, совместный анализ LST и фракции растительности из модели спектральной декомпозиции [Weng et al., 2004].

Встречаются примеры разработки алгоритмов обработки многозональных данных, включающих в себя использование нескольких математических моделей, для оценки связи интенсивности теплового излучения и характеристик поверхности Земли. Например, возможно совместное использование линейной спектральной декомпозиции, извлечения LST, корреляционного анализа, регрессионных моделей [Lu et al., 2006].

Значительная часть работ посвящена разработке методов исследования пространственно-временной динамики «теплого острова» города [Книжников и др., 1991], как сезонной, так и суточной [Doussset et al., 2003; Suga et al., 2003; Chudnovsky et al., 2004; Hung et al., 2006]. Используются данные таких сенсоров, как AVHRR, MODIS, TM, ETM+, а также авиационных и наземных аппаратов. Изучение суточной динамики позволяет достаточно полно оценить тепловые характеристики различных городских объектов, изменение

амплитуды температур в пределах города в течение суток, выявить объекты, формирующие тепловые аномалии в разное время суток, определить время суток, лучше всего подходящее для проведения тепловой съёмки для тех или иных целей [Chudnovsky et al., 2004]. Однако с помощью тепловых космических снимков, полученных сенсорами ТМ и ЕТМ+, иллюстрировать суточное изменение «теплового острова» невозможно в силу особенностей орбиты спутников (орбита солнечносинхронная, в связи с чем спутник проходит над определённым местом в одно и то же время суток), ночные снимки есть, но не имеют широкого распространения. Изучение сезонной динамики позволяет выявить особенности изменения структуры «теплового острова» города, особенности динамики локальных тепловых аномалий, тепловых характеристики антропогенных и природных объектов в течение всего года [Suga et al., 2003].

Имеют место и комплексные исследования, в которых сочетаются построение изображений LST, изучение сезонной и суточной динамики в городах с различными климатическими условиями, статистический анализ, изучение связи между изображениями LST, NDVI и картами land cover/land use, изучение тепловых потоков [Hung et al., 2006]. В таких работах используются как снимки низкого пространственного разрешения и большого охвата, так и снимки со спутников серии Landsat. Исследования такого типа дают многостороннюю оценку «теплового острова» города и вносят существенный вклад в исследования климата города и воздействия урбанизации на окружающую среду.

Отдельно стоит сказать об отечественных работах, в которых в качестве основного источника информации о «тепловом острове» города используются изображения Земли в тепловом инфракрасном диапазоне. Такие работы встречаются достаточно редко. Среди них можно отметить работу отечественных исследователей [Ершова и др., 2001], где охарактеризованы возможности применения данных метеорологических спутников для мониторинга городской среды. Однако этот подход имеет существенные ограничения, т.к. размеры многих городских объектов, оказывающих влияние на формирование «теплового острова», меньше пространственного разрешения снимков систем AVHRR и MODIS. Несомненно, заслуживает внимания работа, посвящённая применению тепловых снимков для эколого-географического картографирования урбанизированных территорий [Коновалова и др., 2008]. В качестве исходных материалов для создания эколого-географических карт городов Прибайкалья использован комплекс космических снимков различного пространственного разрешения и спектрального диапазона, и среди них – тепловые снимки систем AVHRR и ЕТМ+. В частности, снимки системы ЕТМ+ использовались для создания карты теплового излучения структурных элементов городского ландшафта.

Проблемы недостатка данных в тепловом инфракрасном диапазоне.

Настоящий обзор помогает определить, какое место занимают данные дистанционного зондирования земной поверхности в тепловом инфракрасном диапазоне в вопросе изучения «тепловых островов» городов. Тепловые снимки являются наиболее распространённым источником данных о распределении теплового поля города во времени и пространстве. Чаще всего они используются для восстановления температур земной поверхности, для чего разработано большое количество разнообразных алгоритмов, при этом многие из них дают только приближённый результат. Другая важная область применения тепловых снимков – их совместное использование со снимками других типов для оценки городской территории с точки зрения особенностей её использования. На наш взгляд, эта область применения является одной из наиболее перспективных. Именно в ней оказываются наиболее полно задействованными все преимущества тепловых космических изображений, заключающиеся в возможности отображения пространственно-временных особенностей территории, которые крайне сложно получить иным путём.

Как можно видеть из обзора, методы обработки тепловых снимков для изучения «теплового острова» города весьма многообразны. Каждый метод позволяет исследовать одну из сторон «теплового острова» города, использование совокупности методов позволяет получить более-менее целостное представление о «тепловом острове» отдельного города. При этом нельзя не отметить, что особенности современных доступных тепловых снимков ставят некоторые ограничения в изучении «теплового острова» города. Так, например, системы, обеспечивающие наилучшую временную частоту получения снимков, предоставляют снимки невысокого пространственного разрешения. В то же время дающая снимки с пространственным разрешением 60 м система ЕТМ+, установленная на спутнике Landsat-7, находящемся на солнечносинхронной орбите, позволяет получать снимки одной и той же местности в одно и то же время суток, как правило, это – светлое время суток. Существуют ночные снимки Landsat, но их фонд весьма невелик. С одной стороны, эта особенность крайне благоприятна для исследования сезонной динамики теплового излучения, но, с другой стороны, исследовать суточную динамику по таким снимкам мы не можем. При этом ночные тепловые снимки обладают большим преимуществом перед дневными, т.к. они отражают тепловое излучение местности без влияния прямого солнечного излучения.

Нельзя также не отметить тот факт, что пространственного разрешения, равного 60 м, не всегда достаточно для изучения пространственно-временных неоднородностей поля теплового излучения внутри города. Существуют снимки более высокого пространственного разрешения, получаемые с самолётов или вертолётов, а также снимки американского спутника МТІ, работавшего с марта по ноябрь 2000 года и получавшего снимки в тепловом инфракрасном диапазоне с пространственным разрешением 20 м, но в открытом доступе таких материалов нет и получить их весьма сложно либо даже невозможно. Недостатком тепловых снимков со спутников Landsat является также осуществление съёмки только в одном тепловом

канале, что осложняет получение абсолютных значений температуры. Наконец, отметим, что система ТМ, установленная на спутнике Landsat-5, прекратила осуществлять съёмку 18 ноября 2011 года и, вероятно, больше её не возобновит. Система ЕТМ+, установленная на спутнике Landsat-7, который продолжает функционировать, с конца мая 2003 года получает снимки с пропусками данных в виде полос, что обусловлено неисправностью корректора линий сканирования (scan line corrector failure) этой оптико-механической сканерной системы, которую не удалось устранить. Аппаратура TIRS, которая, согласно планам, будет работать на новом спутнике серии Landsat – LCDM, – будет осуществлять съёмку в двух тепловых каналах с пространственным разрешением всего лишь 100 м. Таким образом, лучшим пространственным разрешением в тепловом канале (среди данных дистанционного зондирования, имеющихся в широком доступе) будут характеризоваться снимки системы ASTER (90 м), если не считать снимков системы ЕТМ+ с полосами пропуска данных.

Таким образом, изучение «тепловых островов» городов в ближайшем будущем может столкнуться с проблемой недостатка актуальных данных высокого пространственного разрешения в тепловом инфракрасном диапазоне. Несмотря на это, архивные снимки не теряют своей ценности и могут быть использованы для изучения закономерностей функционирования «тепловых островов» городов.

Заключение.

Проблема «тепловых островов» городов становится на современном этапе развития науки особенно актуальной в связи с вкладом городов в процессы, влияющие на изменение климата. Города являются мощными центрами выбросов в атмосферу парниковых газов, многие из них являются крупными тепловыми аномалиями, над ними формируются зоны повышенной температуры и повышенной загрязнённости воздуха. Внутри самих городов дифференциация теплового поля также значительна, наблюдаются как локальные положительные тепловые аномалии (выше фона), так и локальные отрицательные тепловые аномалии (ниже фона, например, лесные массивы и водные объекты в тёплый период года). Тепловые изображения позволяют выявить пространственную структуру «тепловых островов» городов, определить объекты на территории города, которые вносят наибольший вклад в формирование тепловых аномалий, и, на основе этих данных, принимать решения о рациональной организации городской территории. Это, в свою очередь, позволит повысить комфортность проживания в современных городах и в конечном итоге станет одним из необходимых условий устойчивого развития современных городов.

Библиографический список

1. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съёмка. М.: Недра, 1993. 128 с.
2. Ершова Т.В., Кудашев Е.Б., Мясников В.П., Сюнтюрено О.В., Хохлов Ю.Е. Аэрокосмический экологический мониторинг мегаполисов с использованием новейших ИКТ в контексте формирования информационного общества // Информационное общество, 2001, вып. 5, с. 38-42.
3. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М., Изд-во Моск. Ун-та, 1991. 206 с.: с илл.
4. Коновалова Т.И., Трофимова И.Е. Картографирование экологического состояния урбанизированных территорий на основе материалов дистанционных исследований Земли // Исследования Земли из космоса, 2008, №4, с. 36-44.
5. Константинов П.И. Изменение летних условий микроклимата Московского мегаполиса в условиях глобального потепления: автореф. дис. канд. географических наук: 25.00.30 / Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова. – М., 2011. – 23 с.
6. Кораблёва Е.Г., Ленская О.Ю. Исследования острова тепла города Челябинска в зимний период // Вестник Челябинского государственного университета. 2010. № 8. С. 15-23.
7. Локощенко М.А. Особенности городского «острова тепла» в Москве. – Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. XV Всероссийская школа-конференция молодых учёных. Борок, 2011. С. 19 – 20.
8. Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К. Город, архитектура, человек и климат. М.: Архитектура-С, 2007. 344 с.
9. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исследование Земли из космоса, 2010, № 4, с. 85-90
10. 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.
11. Anquez P., Herlem A. Les îlots de chaleur dans la region métropolitaine de Montréal: causes, impacts et solutions // École des sciences de la gestion de l'Université du Québec à Montréal. Cher de responsabilité sociale et de développement durable. ville.montreal.qc.ca
12. Atkinson B.W. Numerical modelling of urban heat-island intensity // Boundary-Layer Meteorology, 2003, №109, p. 285-310.
13. Cantat O. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps // Norois, 2004, №191 (2004/2), p. 75-102.

14. 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.
15. Chudnovsky A., Ben-Dor E., Saaroni H. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements // *Energy and Buildings*, 2004, №36, p. 1063-1074.
16. Dousset B., Gourmelon F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover // *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, №58, p. 43-54.
17. Gluch R., Quattrochi D.A., Luvall J.C. A multi-scale approach to urban thermal analysis // *Remote Sensing of Environment*, 2006, №104, p. 123-132.
18. 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.
19. Imhoff M.L., Zhang P., Wolfe R.E., Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA // *Remote Sensing of Environment*, 2010, №114, p. 504-513.
20. Johnson D.P., Wilson J.S. The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: The case of heat-related deaths in Philadelphia // *Applied Geography*, 2009, №29, p. 419-434.
21. Lagouarde J.-P., Moreau P., Irvine M., Bonnefond J.-M., Voogt J.A., Sollic F. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France) // *Remote Sensing of Environment*, 2004, №93, p. 443-462.
22. Lokoshchenko M.A., Isaev A.A. Influence of Moscow city on the air temperature in Central Russia. Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate. Poland, Lodz, 2003, Vol.2, p. 449-453.
23. Lu D., Weng Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA // *Remote Sensing of Environment*, 2006, №104, p. 157-167.
24. 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.
25. Peterson T.C. Assessment of Urban Versus Rural In Situ Surface Temperatures in the Contiguous United States: No Difference Found // *Journal of Climate*, 2003, Vol. 16, №18, p. 2941-2959.
26. Poglio T., Mathieu-Marni S., Ranchin T., Savaria E., Wald L. OSIRIS: a physically based simulation tool to improve training in thermal infrared remote sensing over urban areas at high spatial resolution // *Remote Sensing of Environment*, 2006, №104, p. 238-246.
27. 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.
28. Ramachandra T.V., Kumar U. Greater Bangalore: Emerging Urban Heat Island // *Geoinformatic Applications: сетевой журнал*. 20th October 2010. URL: <http://www.geoinformatic.org/archives/1796> (дата обращения: 20.12.10).
29. 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.
30. 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.
31. Srivastava P.K., Majumdar T.J., Bhattacharya A.K. Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data // *Advances in Space Research*, 2009, № 43, p. 1563-1574.
32. Stathopoulou M., Cartalis C. Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece // *Solar Energy*, 2007, №81, p. 358-368.
33. 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.
34. Suga Y., Ogawa H., Ohno K., Yamada K. Detection of surface temperature from Landsat-7/ETM+ // *Advances in Space Research*, 2003, Vol. 32, №11, p. 2235 - 2240.
35. 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.
36. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*, 2003, №86, p. 370-384.
37. 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.
38. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature&ndashvegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*, 2004, №89, p.467-483.
39. Weng Q., Quattrochi D.A. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // *Remote Sensing of Environment*, 2006, №104, 119-122
40. Yang J.S., Wang Y.Q., August P.V. Estimation of Land Surface Temperature Using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity // *Journal of Environmental Informatics*, 2004, №4(1), p. 37-44
41. Zhang J., Wang Y., Li Y. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6 // *Computers & Geosciences*, 2006, №32, p. 1796-1805.
42. Zhu G., Blumberg D.G. Classification using ASTER data and SVM algorithms; the case study of Beer Sheva, Israel // *Remote Sensing of Environment*, 2002, №80, p. 233-240.