

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ЗА КОСМИЧЕСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
Секция „Дистанционни изследвания и ГИС“

маг. Иван Янев

Оценка на динамиката на температурата на земната
повърхност в урбанизирани територии с използване
на дистанционни методи и ГИС

АВТОРЕФЕРАТ

на

дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен

„Доктор“

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ЗА КОСМИЧЕСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
Секция „Дистанционни изследвания и ГИС“

маг. Иван Янев

Оценка на динамиката на температурата на земната
повърхност в урбанизирани територии с използване
на дистанционни методи и ГИС

АВТОРЕФЕРАТ

на

дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен

„Доктор“

Научна специалност 01.04.12 "Дистанционни изследвания на
Земята и планетите"

Научен ръководител: доц. д-р Лъчезар Филчев

Съдържание

Въведение	3
1.1. Обект и предмет на изследването	3
1.2. Цел и задачи на изследването.....	4
II. Характерни особености на температурата на земната повърхност и градските топлинни острови.....	4
1. Терминология.....	4
2. Фактори за образуване и характерни особености на градските топлинни острови.	5
3. Приложение на дистанционните изследвания за оценка на температурата на земната повърхност.	5
4. Поставени и нерешени проблеми	6
III. Разработване на тематична ГИС база данни	7
1. Избор на софтуер за обработка на ГИС базата данни	7
2. Структура на базата данни. Налични данни.	7
2.1. Спътникови изображения	7
2.2. Ортофото изображения.....	7
2.3. Метеорологични данни.....	7
3. Времеви обхват на данните	8
4. Заключение	8
IV. Методология на изследването	8
1. Методи за извличане на температура на земната повърхност (LST) от спътникови изображения	8
1.1. Уравнение на радиационен пренос.....	9
1.2. Едноканален алгоритъм.....	9
1.3. Многоканален алгоритъм	10
1.4. Корекции на излъчвателната способност на повърхността.....	10
2. Теоретичен модел за извличане на температура на земната повърхност от топлинни спътникови изображения.....	11
3. Методи и техники използвани за постигане на целта и задачите на изследването	12
3.1. MODIS LST продукт от ниво 3	12
3.2. Landsat ETM+ и Landsat 8.....	12

4. Физически модел за извличане на температура на земната повърхност от топлинни изображения	15
5. Валидиране на използваните продукти и методи за обработка на топлинни изображения.....	16
5.1. MODIS LST продукт от ниво 3	16
5.2. Landsat.....	17
6. Заключение.....	17
V. Анализи и резултати	18
1. MODIS LST Level 3 продукт	18
1.1. Сравнение между MODIS LST Level-3 продукт и измервания на температурата на въздуха от AWS.....	18
1.2. Корелация между MODIS LST Ниво-3 продукт и измервания на температурата на въздуха от AWS.....	19
1.3. Влияние на типа земно покритие върху корелацията	21
1.4. Оценка на динамиката на температурата на земната повърхност.....	22
1.5. Заключение	23
2. Landsat.....	24
2.1. Визуална оценка на температурата на земната повърхност.	24
2.2. Пространствен модел на градския топлинен остров.	25
2.3. Температура на земната повърхност според типа земно покритие.....	29
2.4. Оценка на промяната на земното покритие според температурата на земната повърхност.....	32
2.5. Оценка на динамиката на температурата на земната повърхност за изследвания времеви период	34
2.6. Заключение	39
БЛАГОДАРНОСТИ	40
ИЗВОДИ.....	40
ПРИНОСИ	45

Въведение

Основен въпрос в градската климатология е как земното покритие взаимодейства с метеорологичното време, за да измени градският климат (Outcalt, 1972). Средната температура на повърхността на дадена площ в града представлява уникален отговор на местното метеорологично време и физическите свойства на повърхността. Характера на градската повърхност контролира обмена на енергия между повърхността и атмосферата, а комбинацията от свойствата на дискретните елементи на повърхността създава мозайка от микроклимати в рамките на града (Pease, Lewis and Outcalt, 1976).

Температурата на земната повърхност (Land Surface Temperature – LST) е важен параметър при изучаването на динамиката на температурата в градска среда. LST модулира температурата на въздуха в приземния атмосферен слой, а освен това е първостепенен фактор при определянето на обмена на енергия в системата земна повърхност-атмосфера, вътрешния климат на сградите и комфорта на хората в градовете (Voogt and Oke, 2003). Физичните свойства на различните типове градски повърхности, техният цвят, откритостта към небосвода, геометрията на улиците, трафика и антропогенната активност са важни фактори, определящи повърхностните температури в градска среда (Chudnovsky, Ben-Dor and Saaroni, 2004). Температурата на градските повърхности е тясно свързана с пространственото проявление и характеристиките на различните типове земно покритие (Lo, Luvall and Quattrochi, 1997).

Градските територии се характеризират с висока хетерогенност, както в хоризонтално, така и във вертикално направление. Промяната и развитието на града влияят върху формирането и динамиката на вътрешния микроклимат на градската среда. Съпътстващата трансформация на яркостните, топлинни, влагозадържащи и аеродинамични свойства води до образуването на набор от отличителни микро- и мезомащабни климати (Roth, Oke and Emery, 1989). Основен инструмент за изучаване на температурата на земната повърхност в съвременните научни изследвания е използването на дистанционни методи.

1.1. Обект и предмет на изследването

Обект на изследване на настоящият дисертационен труд е територия, която ще наричаме градска територия, и в която попадат град София, някои прилежащи вилни зони, промишлени зони и местности, както и селата Бусманци, Волюяк и Герман. Предмет на изследване е температурата на земната повърхност и нейните пространствено-времеви промени за периода от 2000 до 2015 г.

1.2. Цел и задачи на изследването

Целта на настоящия дисертационен труд е, с помощта на дистанционните методи и ГИС, да се анализира и оцени динамиката на промените на температурата на земната повърхност, в урбанизирани територии, причинена от промяната и развитието на градската среда. За постигане на целта са поставени следните задачи:

- Разработване на тематична ГИС база данни;
- Характеризиране и структуриране на отделни типове земно покритие на базата на способността за поглъщане/отделяне на топлина, чрез използване на дистанционни аерокосмически данни;
- Анализиране на връзката между промените на земното покритие и респективно промените в температурата на земната повърхност в рамките на изследваната територия;
- Оценка на динамиката на температурата на земната повърхност в пространствен и времеви аспект.

Глава I. Характерни особености на температурата на земната повърхност и градските топлинни острови

1. Терминология

Топлинният остров по своята същност означава наличие на някаква среда, която е по-топла от заобикалящата я среда (Oke, 1987). Промените на земната повърхност и атмосферата породени от урбанизация водят до промени в градския климат, което най-често се изразява с по-високи температури в града в сравнение с неурбанизираните територии – явление известно, като градски топлинен остров – ГТО (Urban Heat Island, UHI) (Voogt and Oke, 2003). Понятието UHI описва наличието както на по-топъл атмосферен въздух, така и на по-топла земна повърхност в градовете в сравнение със заобикалящите ги неурбанизирани територии (Voogt, 2004). Затова и James A. Voogt отделя три типа градски топлинен остров (UHI), въпреки че в научната литература това понятие най-често се отнася до относителната топлина в приземния слой въздух (canopy layer):

- Градски топлинен остров в слоя на препятствията (CLUHI, Canopy Layer Urban Heat Island)
- Градски топлинен остров в граничния слой (BLUHI, Boundary Layer Urban Heat Island)
- Повърхностен градски топлинен остров (SUHI, Surface Urban Heat Island)

2. Фактори за образуване и характерни особености на градските топлинни острови.

Както вече изяснихме заменянето на естествената земна повърхност със застроени площи (един от елементите на урбанизация) представлява основната причина за образуване на ГТО. Всяко населено място проявява ГТО в зависимост от големината си, а силата на ГТО зависи от структурата на града, гъстотата на застрояване, геометрия на междублоковите пространства (*canyon geometry*), материалите на повърхността, топлината добавяна от човешката дейност, растителните и водните площи в града (Kovats and Hajat, 2008).

Естествената повърхност най-често е съставена от растителност и задържащи влагата почви. Следователно те изразходват сравнително голяма част от погълнатата радиация за изпарение и отделят водни пари, които охлаждат околния въздух (Jacobs, Oke and Rouse, 1997). Противоположно на това, застроените площи са съставени от висок процент неотражаващи и водонепропускливи материали. Следователно, те абсорбират (поглъщат) голяма част от падащата върху тях радиация, която след това се отделя като топлина.

Следователно, характеристики като развитие, растеж, интензитет и пространствен обхват на ГТО ще се различават в зависимост от това, къде се извършват измерванията. Атмосферните ГТО обикновено достигат до максималният си интензитет през летните нощи и при тихо време и безоблачно небе (Yeon-Hee and Jong-Jin, 2002; Zhou *et al.*, 2011), докато повърхностните ГТО обикновено достигат своя максимален интензитет следобед, когато повърхността е значително нагрята и следователно максимизира отделянето на топлина (Baumann, 2009).

3. Приложение на дистанционните изследвания за оценка на температурата на земната повърхност.

Основните продукти от работата на топлинните сензори са температура на земната повърхност (LST) и температура на морската повърхност (Sea Surface Temperature, SST). Те са основа за последващи анализи в множество различни области, въпреки че топлинните дистанционни изследвания (TIR RS) не са толкова широко разпространени (популярни) като ДИ в оптичния и микровълновия диапазон. Във Fuegosat Synthesis Study, проект спонсориран от Европейската Космическа Агенция (ЕКА), приложенията на топлините ДИ са класифицирани в различни предметни области включващи 39 различни приложения, в т.ч. мониторинг на вулкани и пожари, разпознаване на водния стрес в културите и горите, земетресения и минни пожари, оценка на Growing degree day при растенията, анализ на градски топлинни острови, земно покритие и качество на въздуха, картографиране на потенциални райони на епидемии от малария и холера, мониторинг и прогноза за наводнения,

приложения в сигурността като гранична сигурност, идентифициране на обекти, имиграция и т.н. (Sobrino *et al.*, 2013).

Що се отнася в частност до градските територии, дистанционно получените температурни данни са много полезни за картографиране и оценяване на топлинните острови на повърхността (SHI), често наричани градски топлинни острови на повърхността (SUHI) или градски топлинни острови (UHI). Данните за температурата и излъчвателната способност на повърхността в градска среда се използват предимно за анализиране на LST модели и тяхната връзка с характеристиките на повърхността и за оценка на UHI (Quattrochi and Luvall, 1997; Weng, 2009). Други типични приложения от извличането на LST в градска среда са: картографиране на растителността; промени в земното покритие/земеползването; картографиране на сгради включително 3D, загуба на топлина от сградите, оценка на cooling/heating degree day – индикатори за необходимата енергия за охлаждане или затопляне на дадено пространство; анализиране на урбанизационния процес; градска климатология – динамика на градския микроклимат, обмена на топлина между повърхността и атмосферата.

4. Поставени и нерешени проблеми

Основен проблем на топлинните спътникови данни е ниската ПРС. Пространствената разделителна способност на топлинните изображения от опериращите към момента спътници не е достатъчно висока, особено когато се изследва градска среда, където земното покритие е изключително хетерогенно. Липсата на подходяща ПРС води до необходимостта от използването на различни алгоритми за нейното „изкуствено“ подобряване (downscaling) (Stathopoulou and Cartalis, 2009; Zhiwei, Huili and Wenji, 2009; Cao *et al.*, 2012; Zakšek and Oštir, 2012). Времевата разделителна способност (temporal resolution, TR) е друг от проблемите, особено, когато става дума за изследване на динамични процеси. Основна закономерност при топлинните изображения е обратната пропорционалност между ПРС и ВРС – колкото по-висока е ПРС, толкова по-ниска е ВРС и обратно. За извличане на LST в градска среда е необходим инструмент, който „вижда“ земната повърхност в централна проекция. Това е още един лимитиращ фактор при избора на изображения за определена територия.

Занапред са необходими по-задълбочени изследвания и в другите приложни области на LST. Топлинните ДИ имат редица приложения, но изследванията са съсредоточени в по-тесен обхват от теми. Тези данни предоставят добра възможност за комбиниране на топлинен анализ на сгради, енергийни загуби от сгради, изчисляване на cooling/heating degree day индекси, с възможностите на най-новите продукти за 3D моделиране. Друга ниша за обширни проучвания са динамичните процеси в градския микроклимат и по-специално динамиката на температурата на земната повърхност (LST).

В заключение може да се подчертае наблюдаваното нарастване на изследванията в топлинния диапазон. Броя на статиите в бъдеще ще нараства заради факта, че топлинните ДИ са сравнително нови и техните приложни области и научни приложения стават все по-технологично и научно ориентирани в среда на силна взаимовръзка между индустрия и академия.

Глава II. Разработване на тематична ГИС база данни

1. Избор на софтуер за обработка на ГИС базата данни

Всички обработки на данните в географската база данни са извършени в среда на ArcGIS for Desktop, версия 10.3 (ESRI Inc.). За обработка на изображенията е използван инструмента Raster Calculator, а за създаване на моделите и автоматизиране на процесите Model Builder.

2. Структура на базата данни. Налични данни.

2.1. Спътникови изображения

В дисертационният труд са използвани 260 спътникови изображения от 4 сензора монтирани на 4 различни спътникови платформи. Броя на изображенията от всеки сензор е съответно – 9 изображения от TIRS (Landsat 8), 39 изображения от ETM+ (Landsat 7), 107 изображения от MODIS (TERRA) и 105 изображения от MODIS (AQUA).

Като допълнение към спътниковите изображения от Landsat са използвани данни за няколко атмосферни параметъра с цел извършване на атмосферни корекции към изображенията.

2.2. Ортофото изображения

Използвани са 16 ортофото изображения от аерофото заснемането на България през 2011 година. Изображенията покриват цялата територия на изследване и имат следната сигнатура - C2-9, C2-10, C2-11, C2-12, C2-24, C2-25, C2-26, C2-27, C2-39, C2-40, C2-41, C2-42, C2-54, C2-55, C2-56, C2-57. По тях е извършена визуална класификация на изследваната територия обособявайки 16 типа земно покритие.

2.3. Метеорологични данни

В базата данни са включени и метеорологични данни от автоматични измервателни станции, предоставени от различни институции в България, а също и такива със свободен достъп в интернет.

- Национален институт по метеорология и хидрология при БАН.
- Изпълнителна агенция по околна среда (ИАОС).
- Weather underground.

2.4. Пространствени административни данни

В базата данни се съхраняват пространствени административни данни очертаващи границите на изследваната територия, както и участващите квартали. Данните са предоставени от ЕСРИ България.

3. Времеви обхват на данните

За оценка на годишният и сезонен характер на градския топлинен остров са използвани спътникови данни за периода 01.01.2013 – 31.12.2013 г. Използван е осемдневният MODIS Level 3 продукт (MOD11A2 and MYD11A2) предоставящ информация за температурата и излъчвателната способност на земната повърхност. Това включва 46 осемдневни интервала (последният е петдневен) включени в анализа на наземни и спътникови измервания.

За подробен анализ на пространственото проявление на топлинния остров са използвани спътникови изображения от Landsat ETM+ и Landsat TIRS за периода 2000 – 2015 г., за месеци юли и август, като приоритет при избора са датите около и след средата на м. юли. Изборът на изображения е базиран, както на изложените по-рано „Критерии за избор на изображения“, така и на анализа на сезонният характер на интензитета на топлинния остров по изображения от MODIS.

4. Заключение

За обработка на данните е използван софтуер ArcGIS for Desktop версия 10.3. Разработени са критерии за избор на изображения, на базата на които в настоящото изследване са използвани 260 спътникови изображения от инструментите MODIS, ETM+ и TIRS. Данните са структурирани в географска база данни, която включва метеорологични данни от различните институции (НИМХ-БАН, ИАОС, WeatherUnderground), спътникови изображения от MODIS Terra, MODIS Aqua, Landsat ETM+ и Landsat TIRS, ортофото изображения от заснемането на страната през 2011, както и векторни данни за територията на интерес (градска площ, правоъгълен пространствен обхват, квартали, класификация на земната повърхност).

Глава III. Методология на изследването

1. Методи за извличане на температура на земната повърхност (LST) от спътникови изображения

За разлика от директните наземни измервания на атмосферните топлинни острови, дистанционно регистрираните повърхностни топлинни острови представляват индиректно измерване, което изисква да се отчете интервенцията с атмосферата и енергийните свойства на повърхността, които влияят на излъчването и отразяването на електромагнитна радиация в работния спектрален участък на сензора (Voogt and

Оке, 2003). Всеки сензор регистриращ данни в топлинния диапазон записва информацията под формата на цифрови стойности (Digital numbers, DN).

Извличането на LST от различни сензори изисква различни техники за обработка на изображенията. Въпреки това съществуват няколко основни стъпки образуващи модел валиден за всяко изображение заснето в топлинния диапазон:



Фиг. III-1: Обобщен модел за извличане на LST от топлинни изображения.

1.1. Уравнение на радиационен пренос

Най-подходящият метод за извличане на LST е чрез прилагане на RTE (Radiation Transfer Equation) към топлинния канал на сензора (Jimenez-Munoz *et al.*, 2009). Основният недостатък на този метод е необходимостта от наземно измерване на τ , L_d и L_u за спътниковите платформи, като например Landsat, които нямат инструменти за непосредствено измерване на тези атмосферни параметри. Съществуват и други методи за получаването на тези атмосферни параметри, като например използването на глобални модели за атмосферното състояние като MODTRAN (Berk *et al.*, 2011). Друга възможност са базите данни от AERONET (AEROSOL ROBOTIC NETWORK), NCEP/NCAR Reanalysis 1, ATMCOR (Atmospheric Correction Parameter Calculator).

1.2. Едноканален алгоритъм

Методите от този тип също използват алгоритми за изчисляване на LST само от един спектрален канал и извършват атмосферни корекции, базирайки се на RTE.

a) Алгоритъм на Q_{in}

С оглед минимизиране на изискуемите атмосферни параметри (Q_{in} , Karnieli and Berliner, 2001) разработват едноканален алгоритъм (Q_{in} 's Mono-Window algorithm, MW) за извличане на LST от TM6, който изисква само два атмосферни параметъра – пропускливост и средна температура:

b) Алгоритъм на Jimenez-Munoz u Sobrino

Този генерализиран SC метод е също апроксимация на RTE с цел извличане на LST от един топлинен канал, но за атмосферни корекции се изисква единствено данни за съдържанието на водна пара в атмосферата. Алгоритъма е разработен през 2003

г. (Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003) и обновен през 2009 г. (Jimenez-Munoz *et al.*, 2009).

1.3. Многоканален алгоритъм

Многоканалният алгоритъм (Split Window, SW) използва два топлинни канала, обикновено в диапазона 10÷12 μm . В основата му стои факта, че намаляването на лъчистата енергия поради поглъщането от атмосферата е пропорционално на разликата в лъчистата енергия от едновременното измерване в два спектрални канала, всеки от които е обект на различно количество поглъщане от атмосферата (McMillin, 1975).

1.4. Корекции на излъчвателната способност на повърхността

Излъчвателната способност представлява отношението между лъчистата енергия на даден обект при определена температура и лъчистата енергия на абсолютно черно тяло при същата температура (Kuenzer and Dech, 2013)

$$\varepsilon = \frac{M_r}{M_b}$$

където M_r е енергията излъчена от обекта, а M_b е енергията излъчена от черно тяло.

Излъчвателната способност се влияе от множество фактори (цвят, грапавост на обекта, съдържание на влага, плътност, дължина на вълната, зрителен ъгъл на сензора), но не е температурно зависима (Flynn, Harris and Wright, 2001; Hall, 2007).

а) Изчисляване на излъчвателната способност по дефиниция.

Излъчвателната способност може да се получи, чрез директно прилагане на дефиницията за ε ($\varepsilon = M_r/M_b$) или, чрез прилагане на закона на Кирхов ($\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$, където ρ_λ е отразената от обекта радиация).

б) Метод с прагови стойности на NDVI

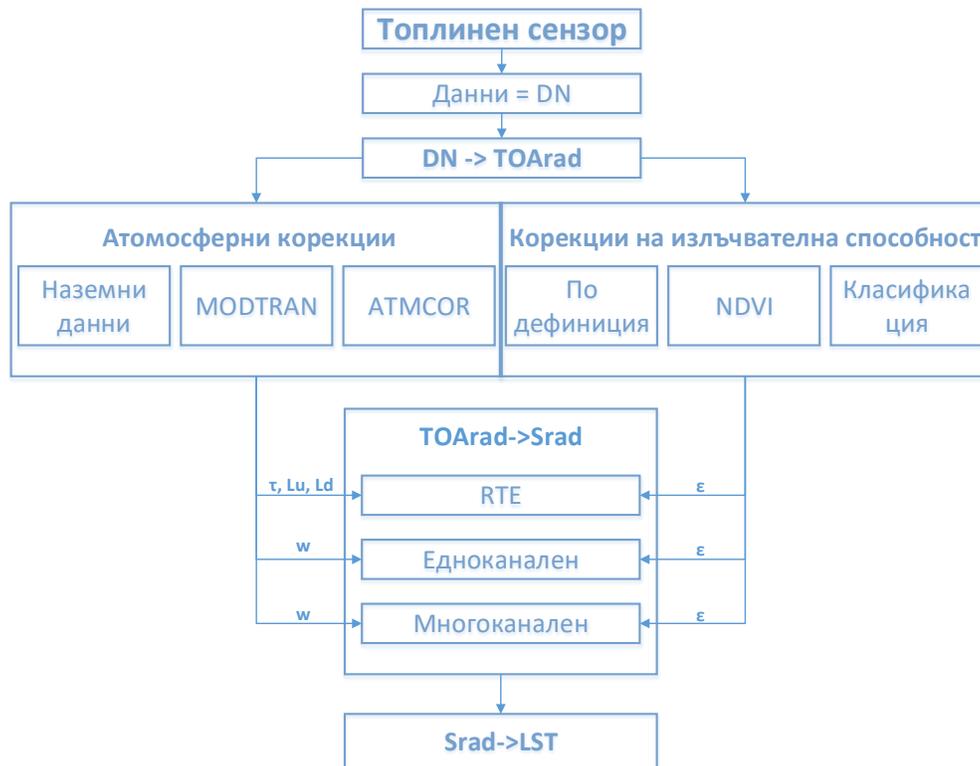
Този метод се базира на зависимостта между количеството растителност присъстващо в един пиксел и излъчвателната способност на пиксела, допускайки че дадено изображение е съставено от два компонента – почва и растителност (Brunsell and Gillies, 2002). Необходими са данни за стойностите на излъчвателната способност на почвата и растителността. Тези стойности могат да бъдат измерени на терен, да се използват данни от научната литература за измерени стойности или да се използва спектралната библиотека от ASTER (Baldrige *et al.*, 2009).

с) Метод базиран на класификация

Този метод се състои в класифициране на изображението и предаване на стойност ϵ за всеки клас. Стойността за излъчвателна способност може да се измери на терен, да се използват известни (вече измерени) стойности от научната литература или да се използват спектрални библиотеки като тези от ASTER (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>) и MODIS (<http://www.icesb.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>). Този метод изисква измерване на ϵ при същото състояние на обекта, в което се е намирал в момента на заснемане (Flynn, Harris and Wright, 2001).

2. Теоретичен модел за извличане на температура на земната повърхност от топлинни спътникови изображения

Надграждайки обобщеният модел, изготвеният теоретичен модел се базира на гореописаните методи за извличане на LST от топлинни изображения. Освен основните стъпки за преобразуването на пикселните стойности в LST, тук са включени различни методи за получаването им, атмосферни корекции и корекции на излъчвателната способност.



Фиг. III-2: Теоретичен модел за извличане на LST от топлинни изображения, където ϵ е излъчвателна способност, τ е атмосферната пропускливост, Lu е лъчистата енергия с посока към сензора, Ld е лъчистата енергия с посока към земната повърхност, w е съдържанието на водна пара в атмосферата.

3. Методи и техники използвани за постигане на целта и задачите на изследването

В настоящото изследване са използвани спътникови данни от MODIS и Landsat. Тъй като MODIS разполага със собствени LST продукти, изображенията не са обработвани допълнително, освен прилагането на мащабен фактор (наличен в официалната документация) към пикселните стойности. Изображенията от Landsat, обаче изискват обработки, за да се извлекат стойности за температурата на земната повърхност. По-долу подробно са описани използваните продукти, методите за обработка на изображенията и обработката на данните от наземни измервателни станции.

3.1. MODIS LST продукт от ниво 3

Тъй като в MODIS LST Level-3 продукта има извършени геометрични, атмосферни и корекции за излъчвателна способност, предварителната обработка на изображенията се свежда единствено до преизчисляване с помощта на мащабен коефициент (scale factor) на пикселните стойности и преобразуване на стойностите от Келвини в градуси по Целзий. Продукта MOD/MYD11A2 съдържа осемдневни дневни и нощни данни, като за всеки отрязък са налични по 4 наблюдения. Те са допълнително осреднени с цел да се комбинират данните от TERRA и AQUA MODIS LST Level-3 продукта и да се добият по-точни среднодневни температури. Осредняването е извършено чрез обикновен метод за осредняване. Ако едно от четирите наблюдения липсва, средната стойност е третирана като „NoData“.

В настоящото изследване данните от MODIS LST продукта и измерванията от АИС са статистически сравнени по два начина. Първо, осреднените данни от MODIS LST са сравнени с осреднените наземни температурни измервания, чрез използване на описателна статистика. Второ, данните от MODIS LST са сравнени с наземните измервания съответстващи на дневните и нощни наблюдения от инструмента MODIS.

3.2. Landsat ETM+ и Landsat TIRS

Всички изображения от Landsat ниво 1Т и продукта от по-високо ниво са с включени радиометрични и геометрични корекции. Затова в етапа на предварителна обработка можем да включим единствено изрязването на изображенията спрямо правоъгълният пространствен обхват образуван от крайните координати на границата на област София.

Изчисляване на стойности за излъчвателна способност.

Вече стана ясно, че всеки тип земна повърхност има различна излъчвателна способност (ϵ , emissivity), която се влияе от моментното физично състояние на обекта. Затова е важно стойността на ϵ да е измерена в момента на преминаване на спътниковата платформа за всяко отделно изображение. Тъй като ние не разполагаме с подобни теренни измервания, се налага да използваме някой от методите за изчисляване на този параметър. При метода с класификация се задава осреднена стойност (по данни от публикувани измервания или спектрални библиотеки) за всеки тип земна повърхност, но така може да не се вземе предвид моментното състояние на обекта. Затова решаваме да използваме метода чрез прагови стойности за NDVI, при който стойностите за един тип земно покритие могат да варират в зависимост от момента на заснемане.

Атмосферни корекции.

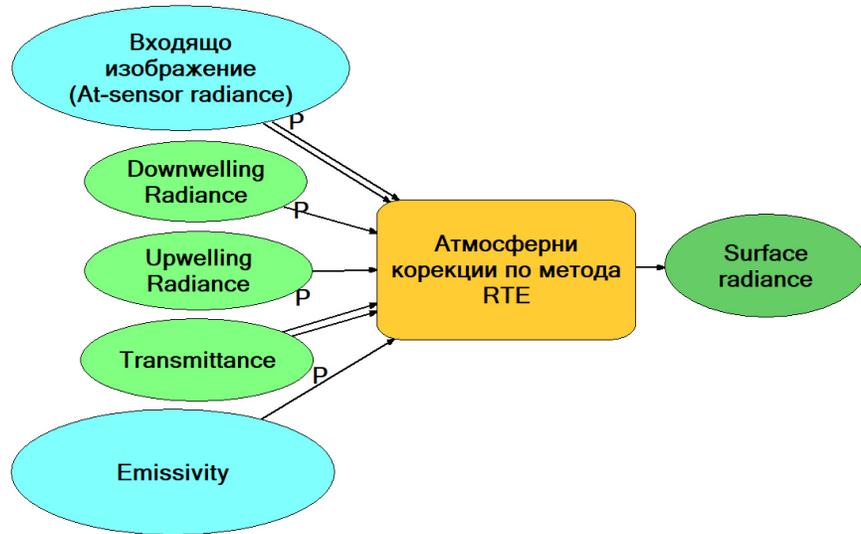
Използвали сме два метода за изчисляване на излъчването от земната повърхност (surface radiance) – Уравнение за радиационен пренос (RTE) и Едноканален алгоритъм на Jimenez-Munoz и Sobrino (SC).

За да извършим тези корекции са ни необходими данни за пропускливостта на атмосферата (τ), възходящата лъчистата енергия (upwelling radiance, L_{λ}^{\uparrow}), низходящата лъчиста енергия (downwelling radiance, L_{λ}^{\downarrow}) и съдържанието на водна пара (w). Тези параметри сме взели от уеб-калкулатор за атмосферни корекции (Atmospheric Correction Parameter Calculator, URL: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>).

При уравнението за радиационен пренос (RTE) са ни необходими първите три параметъра, а при едноканалният алгоритъм (SC) само стойност за водна пара.

Уравнение за радиационен пренос:

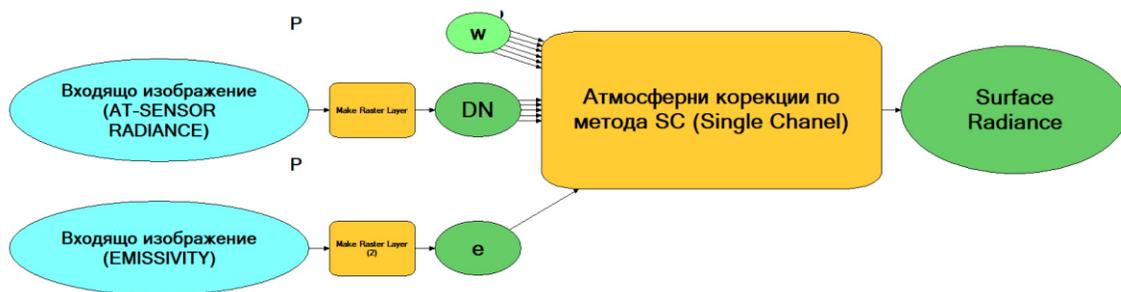
$$B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{sen,\lambda} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau_{\lambda}(1 - \epsilon_{\lambda})L_{\lambda}^{\downarrow}}{\tau_{\lambda}\epsilon_{\lambda}} \quad (1)$$



Фиг. III-3: Модел за премахване на влиянието на атмосферата по метода RTE (Radiation Transfer Equation).

Едноканален алгоритъм на Jimenez-Munoz и Sobrino:

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (2)$$

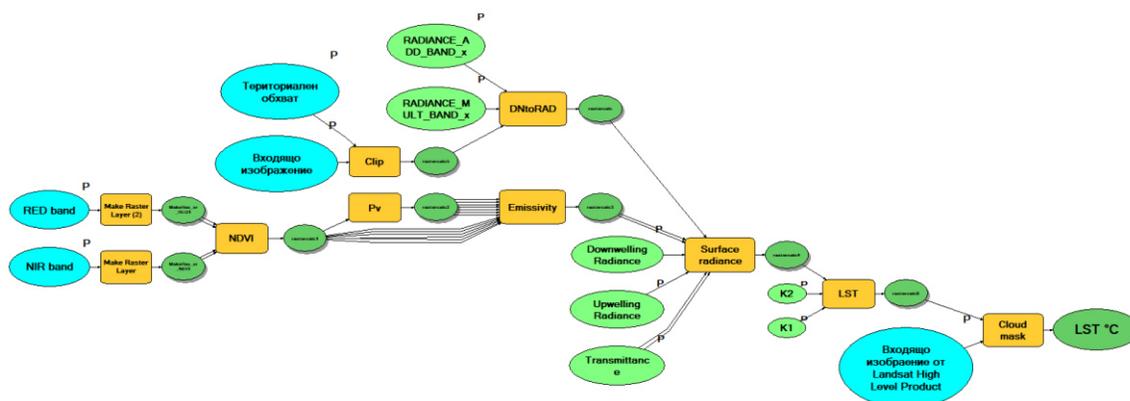


Фиг. III-4: Модел за премахване на влиянието на атмосферата по метода SC (Single Chanel) по (Jimenez-Munoz et al., 2009).

4. Физически модел за извличане на температура на земната повърхност от топлинни изображения

Подготвеният физически модел представлява реален модел, с който са обработени изображенията в настоящото изследване. Моделът е реализиран чрез инструмента Model Builder в среда на ArcGIS for Desktop 10.3 и обхваща всички стъпки по обработка на изображението – от оригиналното изображение на Landsat ниво 1T до изображение със стойности на температурата на земната повърхност. Стъпките по създаване на модела включват:

1. Изрязване на изображението според обхвата на територията на интерес;
2. Преобразуване на цифровите стойности на изображението (DN) в стойности на лъчистата енергия регистрирана от сензора (At-sensor radiance);
3. Изчисляване на стойности на NDVI;
4. Изчисляване на стойности на частта заета от растителност (Pv, vegetation proportion);
5. Изчисляване на стойности на излъчвателната способност (ϵ , emissivity);
6. Преобразуване на стойностите на лъчиста енергия регистрирана от сензора в стойности на лъчиста енергия на повърхността (Surface radiance);
7. Преобразуване на лъчистата енергия на повърхността в стойности на температура на земната повърхност (LST);
8. Замаскиране на стойностите отнасящи се към облаци или облачна сянка.



Фиг. III-5: Физически модел за извличане на LST от топлинни спътникови изображения.

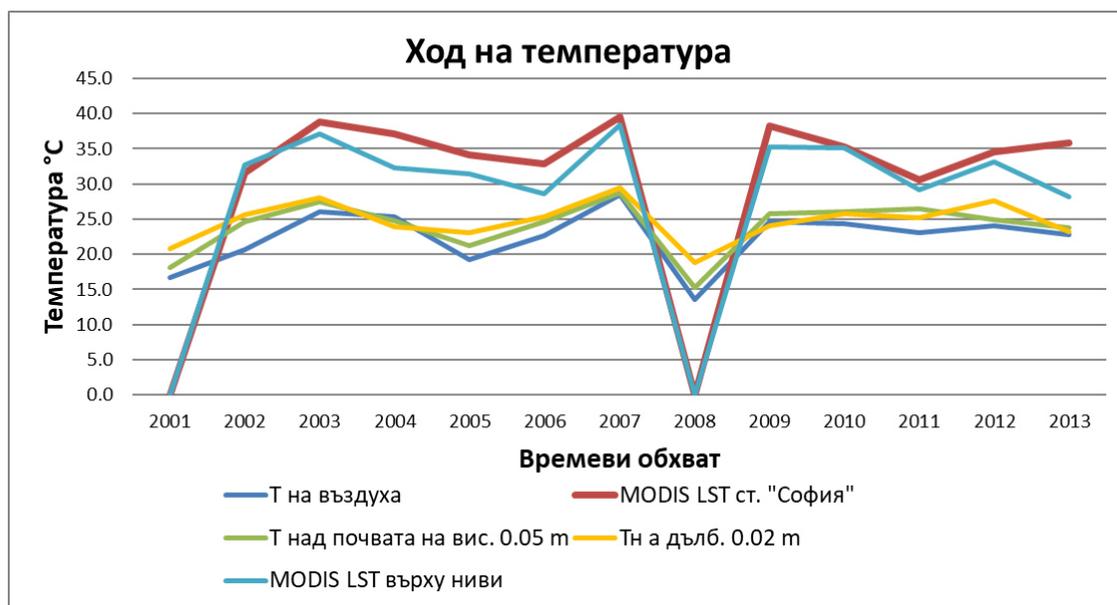
5. Валидиране на използваните продукти и методи за обработка на топлинни изображения.

5.1. MODIS LST продукт от ниво 3

За да валидираме използваните LST продукти и резултатите от обработените топлинни изображения са необходими данни от теренни измервания, които да са достатъчно достоверни. Като такива ще ни послужат метеорологичните данни от НИМХ-БАН и по конкретно данните от станция „София“, тъй като за нея имаме налични измервания за температура на почвата. За да оценим точността на данните от MODIS сме използвали данни от MODIS TERRA за периода от 2000 до 2013 г. за един и същи ден от годината – 23 юли. Тъй като в пиксела попадащ върху метеорологичната станция присъства изключително хетерогенна земна повърхност, за корелация сме използвали и близко стоящ пиксел попадащ изцяло върху ниви.

Табл. III-1: Корелация между данните от MODIS LST и метеорологични данни (НИМХ-БАН).

	Температура на въздуха	Над почвата на вис. 0.05м	На дълб. 0.02м, °С
MODIS LST ст. "София"	0,87	0,89	0,78
MODIS LST ниви	0,87	0,91	0,83
Температура на въздуха		0,95	0,87
Над почвата на вис. 0.05м	0,95		0,91



Фиг. III-6: Графика на хода на температурата по спътникови и метеорологични данни за 23 юли за периода 2000-2013 г.

5.2. Landsat

Подобна валидация е направена и с данните от Landsat. Получените резултати по двата метод RTE (Radiative Transfer Equation) и JMS (Jimenez-Munoz & Sobrino) са сравнени с метеорологичните данни, с които разполагаме. Всички данни от НИМХ са за станция „София“ и представляват съответно средна дневна температура на въздуха, температура на почвата в 14:00 часа и осреднена температура на почвата от стойности в 7, 14 и 21 часа. В същото време разполагаме с почасови данни за всяка от измервателните станции на ИАОС. Съответно сме взели стойността в 12 часа, която съвпада с преминаването на Landsat над територията на изследване.

Метода JMS има по-висока корелация с метеорологичните данни спрямо метода RTE. Корелационните коефициенти със средната стойност от ИАОС ($r = 0.83$) и средната температура на въздуха от НИМХ ($r = 0.80$) са по-високи спрямо същите показатели по метода RTE – съответно 0.78 и 0.73. Максималната корелация при станция „Хиподрума“ е 0.91 при 0.86 за метода RTE, а минималната (за станциите на ИАОС) съответно 0.73 срещу 0.62. От горната фигурата също личи по-близката линия на метода JMS, което говори за надценяване на стойностите по метода RTE спрямо метода JMS. Прави впечатление по-ниската корелация между температурата на повърхността извлечена от спътниковите изображения и температурата на почвата по метеорологични данни. Взели сме стойностите от 14 часа, което най-много се доближава до заснемането от спътника в ≈ 12 часа, но корелационният коефициент в този случай е в порядъка на едва 0.35–0.43. Осреднихме стойностите от 7, 14 и 21 часа, а в резултат корелацията стига нива от 0.50 за метод RTE и 0.58 за метод JMS. Въпреки това стойността е по-ниска спрямо тази от корелацията с средната температурата на въздуха от 0.73 за метод RTE и 0.80 за метод JMS. Затова решихме да сравним данните от НИМХ помежду им. От Табл. III-2 се вижда, че дори между метеорологичните данни на НИМХ липсва висока корелация с температурата на почвата в 14 часа. Стойността е около 0.60 за средната температура на въздуха по данни от НИМХ София и средната температура на въздуха от станциите на ИАОС.

Табл. III-3: Корелация между метеорологичните данни.

Станция	НИМХ София ср. t на почвата	НИМХ София (14:00) t на почвата
НИМХ София ср. t на въздуха	0.82	0.63
ИАОС ср. t на въздуха	0.73	0.56

6. Заключение

В трета глава от настоящото изследване са описани използваните методи за обработка на изображенията. Разгледани са уравнение за радиационен пренос, едноканален и многоканален алгоритъм за извличане на температура на

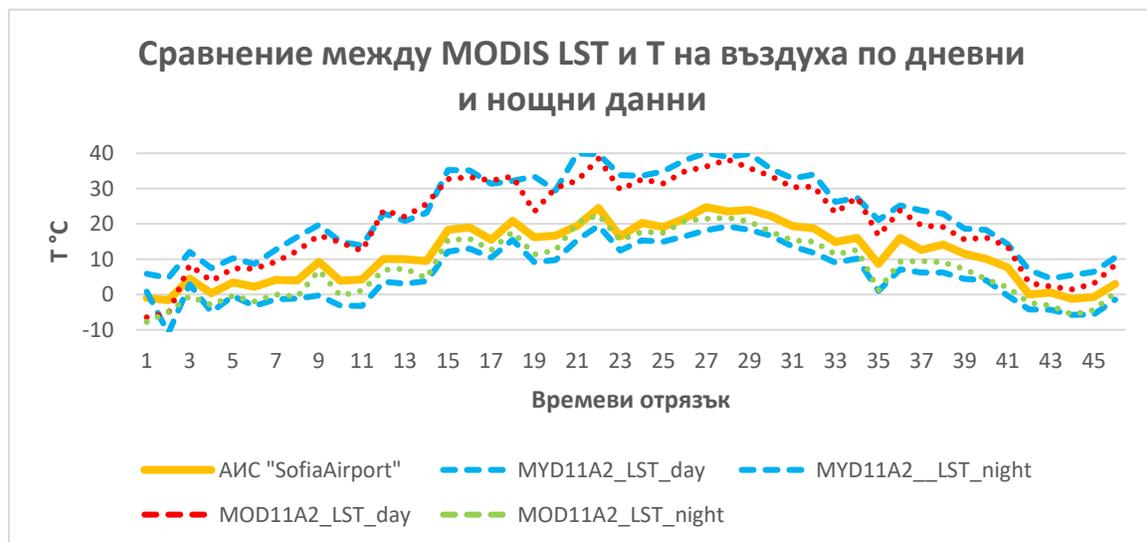
повърхността от спътникови изображения, както и методите за корекция на излъчвателната способност на повърхността. Подробно са описани използваните данни, както и всички стъпки на обработването им. В резултат са създадени обобщен, теоретичен и физически модел за извличане на температура на земната повърхност по топлинни изображения. В края е извършено валидиране на използваните готови LST продукти и на резултатите от методологията използвана в настоящата разработка. Резултата от валидацията показва високи корелационни стойности, както при използваният MODIS LST продукт от ниво 3 (около 0.90), така и при извлечените стойности от Landsat. От представените методи за обработка на изображенията, като по-успешен е установен метода JMS с корелационен коефициент 0.83, докато при метода RTE са наблюдава надценяване на температурните стойности.

Глава IV. Анализи и резултати

1. MODIS LST Level 3 продукт

1.1. Сравнение между MODIS LST Level-3 продукт и измервания на температурата на въздуха от AWS.

Извършена е корелация между наземните измервания и дневни и нощни измервания на LST получени от MODIS TERRA и AQUA. От визуалната интерпретация на Фиг. V-1 очевидно има силна корелационна зависимост между AWS „Sofia Airport“ и всяко от MODIS LST наблюденията. Въпреки това ясно се виждат различията в абсолютните стойности. Стойностите от нощните спътникови наблюдения са по-близо до тренд линията на AWS отколкото стойностите от дневните спътникови наблюдения. Що се отнася до дневните тренд линии се наблюдават сезонни вариации.

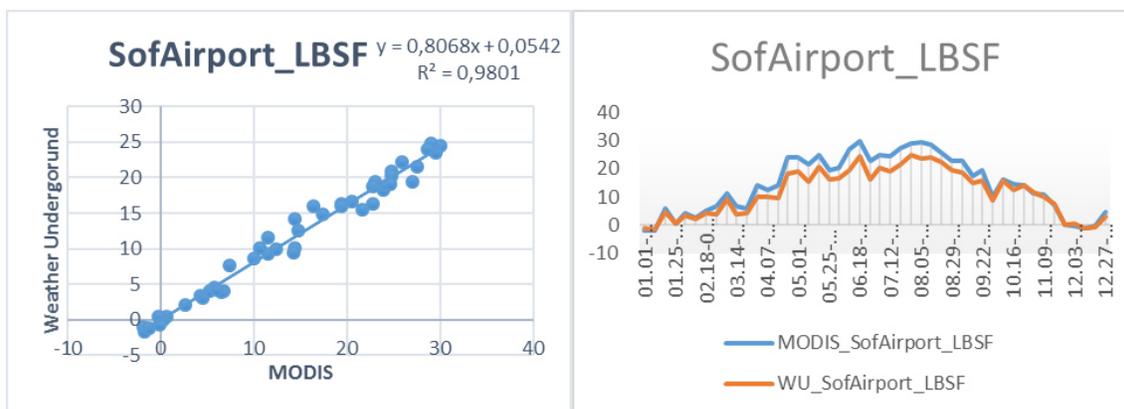


Фиг. IV-1: Сравнение между наземни измервания на температурата на въздуха от AIC и MODIS LST наблюдения за 2013.

1.2. Корелация между MODIS LST Ниво-3 продукт и измервания на температурата на въздуха от AWS.

Както вече беше споменато използвани са метеорологични данни от 8 AWS. Изготвени са графики с регресионна и тренд линия за всяка от тях, за да се види корелационната зависимост между двата типа данни. В Табл. V-2 е представен R2 корелационен коефициент заедно с други статистически показатели.

MODIS LST Ниво-3 продукта има много силна корелация с всяка от автоматичните измервателни станции (AWS), която варира от 0.97 до 0.99. Единствено AWS „Manastirski livadi“ има стойност 0.95. Линиите на температурния ход се движат почти идентично през зимните месеци, но през летните месеци се наблюдава надценяване на стойностите от MODIS LST. Изключение правят AWS „Bistritsa“ и „Воуана“, където тренд линиите от двата типа данни лежат една върху друга дори през летните месеци. Тези две станции показват най-добри резултати. Изчислени са няколко статистически показатели. Средното отклонение (Mean Bias, което всъщност е средната T_s – средната T_a) е съответно 0.67 и 0.85, средната абсолютна грешка (MAE) е около 1.1, средната квадратична грешка (RMSE) близо 1.4 и стандартното отклонение (SD) с 95% доверителен интервал - 1.72/1.77. Ако разделим резултатите по групи ще видим, че станции „Simeonovo“, „Yavorov“ и „Manastirski livadi“ имат доста сходни стойности, а станции „Kazichene“ и „Lyulin“ формират друга група с почти идентични резултати. Под този рейтинг на показателите се намира станцията „Sofia Airport“. Нейното средно отклонение е 2.72, MAE - 2.82, RMSE – 3.53 и SD – 4.27 (95% сигурност). Възможна причина за тези резултати е факта, че пиксела от MODIS, в рамките на който попада станцията, обхваща територия заета от високи сгради, докато метеорологичната станция е разположена върху тревна площ.



Фиг. IV-2: Регресионна права (ляво) на АИС и MODIS LST за станция „SofAirport_LBSF“ и сравнение на тренд линиите на осемдневните времеви серии за същата станция (дясно).

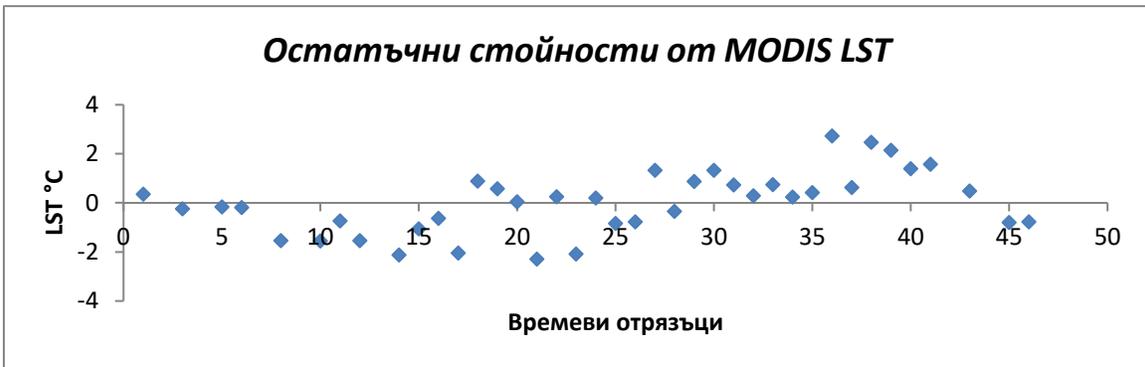
Табл. IV-1: Описателна статистика по данни от АИС и извлечените пикселни стойности от MODIS LST.

	MODIS_Sofia Airport	MODIS_WU_Sofia Airport	MODIS_Simeonovo	MODIS_WU_Simeonovo	MODIS_Yavorov orove	MODIS_WU_Yavorov orove	MODIS_Kazichenichene	MODIS_WU_Kazichenichene	MODIS_Bistritsa	MODIS_WU_Bistritsa	MODIS_Boyana	MODIS_WU_Boyana	MODIS_Manastirdi	MODIS_WU_Manastirdi	MODIS_Livadi	MODIS_WU_Livadi	MODIS_Lyulin	MODIS_WU_Lyulin
MIN	-1,90	-1,63	-4,37	-1,50	-1,41	0,16	-1,82	-1,50	-3,19	-3,00	-2,81	-2,75	-3,08	-1,00	-3,82	-0,38		
MAX	30,05	24,75	26,14	23,50	29,43	26,63	28,92	24,13	23,57	23,25	24,42	23,00	27,45	24,63	28,45	24,50		
Absolute MIN difference (Ts-Ta)	0,28		2,87		1,57		0,32		0,19		0,06		2,08		3,45			
Absolute MAX difference (Ts-Ta)	5,30		2,64		2,81		4,79		0,32		1,42		2,83		3,95			
R2	0,97		0,97		0,99		0,98		0,97		0,98		0,95		0,97			
Mean Bias (Ts-Ta)	2,72		1,44		1,16		2,13		0,67		0,85		1,02		1,68			
MAE	2,82		1,80		1,76		2,36		1,06		1,11		1,76		2,27			
RMSE	3,53		2,20		2,13		2,87		1,36		1,42		2,12		2,78			
SD(95% confidence)	4,27		2,52		2,63		3,26		1,72		1,77		2,49		3,21			

Внимателното изследване на Фиг. V-3 потвърждава допускането за сезонност в данните от MODIS LST Level-3 продукта. С цел да проверим по-задълбочено тази тенденция анализирахме остатъчните стойности (residuals) от MODIS – „Sofia Airport“ данните.



Фиг. IV-3: Графика на остатъчните стойности от MODIS LST данните за станция „Sofia Airport“ спрямо температурата на въздуха за същата станция.



Фиг. IV-4: Графика на остатъчните стойности от MODIS LST данните за станция „Sofia Airport“ спрямо времевите отрязъци.

На Фиг. V-3 са използвани данни за температурата на въздуха от станция „Sofia Airport“ за оста X и данни за LST от пиксела попадащ на същото местоположение за оста Y. При температури до 5 C° стойностите са подценени с до -2 C°, но след това температурните стойности от MODIS LST подценяват или надценяват реалните температури с ± 2 C°. Може би има и тенденция на надценяване при температура над 20 C°, но тези интервали са твърде малко, за да направим генерални заключения. Общо казано стойностите предвидени от модела са в рамките на ± 2 C° за дадена температурна стойност от MODIS LST.

На Фиг. V-4, обаче очевидно има по-ясни резултати. Този път по оста X са разположени времевите отрязъци. По този начин се наблюдава тенденция на плавно отместване на прогнозните стойности по протежение на времевите отрязъци. Това отместване се изразява в подценяване във зимните отрязъци, смесено или надценяване в преходните отрязъци и надценяване в летните отрязъци.

1.3. Влияние на типа земно покритие върху корелацията

Стойността на даден пиксел на MODIS LST е комбинация от температурните свойства на всички съдържащи се типове земно покритие (Zhan *et al.*, 2013). В Табл. V-3 е описан типа земно покритие попадащ в съответните пиксели на MODIS. Сравнявайки присъствието на различни типове земно покритие със статистическата информация от Табл. V-2 се наблюдава интересна тенденция относно влиянието на града върху температурата на земната повърхност (LST). По-рано комбинирахме статистическите резултати по групи на база техният статистически рейтинг. Комбинирането на тези групи с типа земно покритие на пикселите отговаря на въпроса относно влиянието на града върху LST.

Табл. IV-2: Сравнение на статистическите групи с типа земно покритие на пикселите на MODIS LST.

Sofia Airport	Високи сгради
Simeonovo	50% Застроена, 50% незастроена площ
Yavorov	70% Застроена, 30% Парк
Kazichene	75% Гъсто застроено ниско строителство с растителност, 25% незастроена площ
Bistritsa	Празна площ
Boyana	40% Застроена, 60% Гъста гора
Manastirski livadi	70% Застроена, 30% незастроена площ
Lyulin	70% Високи сгради, 30% незастроена площ

Както вече констатирахме станция „Sofia Airport“ (в червено) има най-лошият статистически резултат, изразяващ се в повишаване на тренд линията през летните месеци и по-високи стойности на MAE, RMSE и SD. Подпикселната площ се състои от високи сгради и пътища, което води до по-висока температура на повърхността. Затова и MODIS LST продукта измерва 5.30 C° по-висока абсолютна максимална температура в сравнение със станция „Sofia Airport“ (Табл. V-2). Оранжевата група, която се състои основно от високи сгради и гъсто застроени ниски сгради има малко по-добри резултати, което вероятно се дължи на присъствието на 25-30% незастроена площ. Следващата, жълта група съдържа микс от застроени площи, незастроени площи и паркове, а зелената група, при която има най-добри резултати, се състои от незастроени площи или преобладаващо гъста гора.

1.4. Оценка на динамиката на температурата на земната повърхност.

За да анализираме интензитета на температурата в града осреднихме дневните и нощните изображения за 2013 г. налични от MODIS LST Level 3 продукта. На следващите графики се вижда, че интензитета на топлинния остров е най-осезаем през лятото през деня. Освен това през зимните месеци през деня почти не може да се наблюдава топлинен остров в града, а с повишаване на средната дневна температура расте и интензитета на топлинния остров. От друга страна по нощните изображения се вижда, че през нощта кривата е доста по равномерна през цялата година. Топлинния остров се проявява целогодишно с по-висок интензитет през топлото полугодие.



Фиг. IV-5: Интензитет на градския топлинен остров на повърхността по осреднени дневни стойности за 2013 г.



Фиг. IV-6: Интензитет на градския топлинен остров на повърхността по осреднени нощни стойности за 2013 г.

Досега разгледахме хода на температурата за период от една година, с което видяхме денонощното и сезонното проявление на температурите, както и високата корелационна зависимост между данните от MODIS LST продукта и метеорологични данни. Въпреки ниската ПРС изображенията от MODIS могат да бъдат използвани за анализ на топлинния остров в градската среда. За да се оцени динамиката на температурата и да се улови тренд на развитие в денонощния, сезонния или годишния ход е необходимо да се обработят данни за дълъг времеви период. Тъй като целта на настоящата разработка е в анализа да се вземе предвид влиянието на типа на земното покритие, подробно изследване на пространственото проявление и динамика на температурата в града ще извършим с данни от Landsat в следващата глава от дисертационния труд.

1.5. Заключение

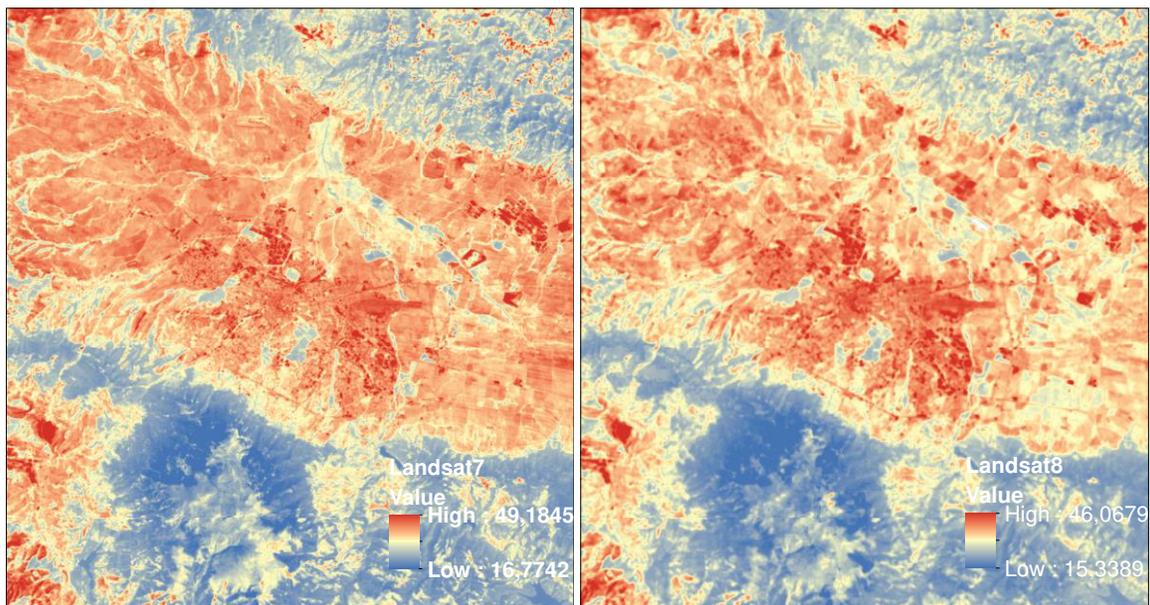
Съществува много силна корелационна зависимост с изразена сезонност между MODIS LST Level-3 продукта и наземните измервания на температурата на въздуха. Изчислената средна стойност на R^2 е 0.97, а средните стойности на MAE, RMSE и SD с 95% доверителен интервал са съответно 1.87/2.30/2.73. Резултатите са подчертано повлияни от типа земно покритие. Затова при станциите с преобладаващи не урбанизирани площи имат по-точни прогнозни стойности (MODIS LST) от станциите с преобладаващо присъствие на непромокаеми площи. Тренд линиите са почти идентични през зимните месеци, но се раздалечават през летните. Фиг. V-1 показва, че този тренд и верен само за дневните MODIS LST наблюдения. От residual плотът и Табл. V-2 можем да констатираме, че движещата сила за сезонността не е покачването на температурите само по себе си, а осветеността от Слънцето в комбинация с присъствието на непромокаеми повърхности. Що се отнася до

корелацията между тези два типа температурни измервания друг влияещ фактор може да бъде надморската височина. Въпреки това с наличните данни не можем да открием силна зависимост между измерванията от MODIS и AWS с оглед на надморската височина. Имайки предвид, че съпоставяме повърхностни температури с температура на прилежащия въздух, абсолютно е възможно да има сезонност в резултатите, която може да бъде повлияна от много други климатични процеси като например адвекция. Въпреки това, силната корелация и ниското ниво на MAE, RMSE и SD доказват приложимостта на MODIS LST Level-3 продукта в изследването на градските топлинни острови (UHI).

2. Landsat

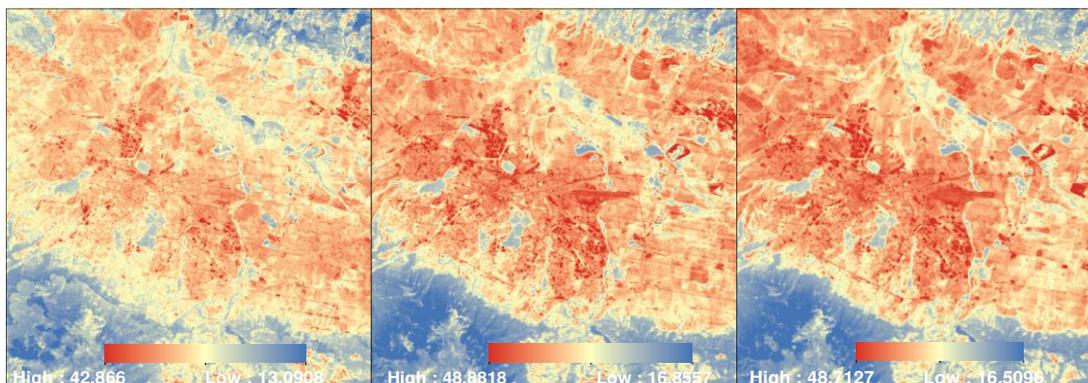
2.1. Визуална оценка на температурата на земната повърхност.

Известна част от наличните изображения на Landsat отпаднаха от анализа поради различни причини – наличие на облачна покривка, липсващи данни в продукта от по-високо ниво или пък липси в данните за атмосферни параметри. Следователно в анализа са включени единствено валидни изображения, общо 35 на брой – 6 от Landsat 8 в периода 2013 – 2015 г. и 29 от Landsat 7 за периода от 2000 до 2015 г.



Фиг. IV-7: Осреднени данни от всички изображения за Landsat 7 (ляво) и Landsat 8 (дясно).

Тъй като наблюдаваме температурите за период от 15 години е особено интересно да се види дали и в каква посока има развитие на стойностите. За целта разделихме изображенията на три интервала – от 2000 до 2005 г., 2006–2010 г. и 2011–2015 г. Така разпределени в първия интервал попадат 4 изображения, а в следващите два съответно 12 и 19.



Фиг. IV-8: Осреднени стойности на LST за три времеви интервала – 2000–2005, 2006–2010, 2011–2015 г. (от ляво надясно).

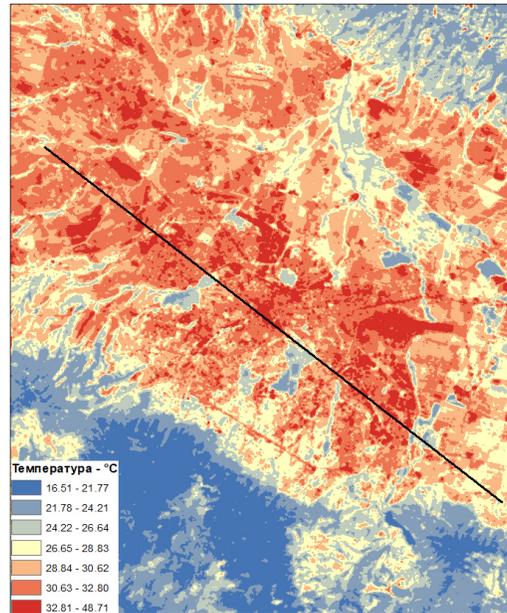
Вижда се тенденцията за постепенно нарастване на червените зони в изображенията, като това е доста по-осезаемо между първите два интервала. При внимателно изследване на изображенията в подходящ мащаб се забелязва насищане (сгъстяване) на всеки от температурните интервали.

2.2. Пространствен модел на градския топлинен остров.

Град София образува топлинен остров с типични пространствени характеристики. Поради оголеността на земната повърхност в софийското котловинно поле ясно изразен клиф или стръмен температурен градиент на границата с града се наблюдава само от Юг, където градската територия граничи непосредствено с Витоша планина. От Север, Запад и Изток се наблюдава по слабо понижение на температурата на границата между града и Софийската котловина. Града се отличава с голяма хетерогенност на температурния профил. Така нареченото плато или територията на плавно повишаване на температурата от периферията към центъра на града е често прекъсвано от микро градски топлинни острови на местата с големи антропогенни обекти и индустриални площи и места с т. нар. heat sinks или особено студени площи образувани от големите градски паркове и места с обособена гъста растителност. Топлинния профил се отличава с ясно изразен пик на температурата в центъра на града.

При така получените резултати е интересно да се разгледа разликата в температурния профил в зависимост от пространственото направление. Построявайки линеен граф с направление Запад–Изток профила на температурата повече се доближава до теоритичният профил на един градски топлинен остров. На следващият граф е изобразен профил с направление Северозапад–Югоизток. Температурата на повърхността извън града варира в диапазона 30–32 °С. На границата с града се образува микро ГТО причинен от индустриални обекти покачващи температурата до 36–38 °С, след което температурата в града се движи с около градус над тази извън града в диапазона 31–33 °С до достигането на първата

студена зона дължаща се на „Западен парк“. Температура тук се понижава до 25 °С, а след това следва постоянно повишаване до достигането на централната градска част. В нея температурата достига до 37 °С. Близко до пика на температурата в центъра се намира следваща студена зона свързана с „Южен парк“. След това температурата се движи отново в диапазона 30–34 °С с прекъсвания от микро ГТО превишаващи 40 °С. На границата от Изток се намира парк „Врана“, който образува поредната студена зона, след която температурата в извънградската част постепенно намалява от 30 °С надолу.



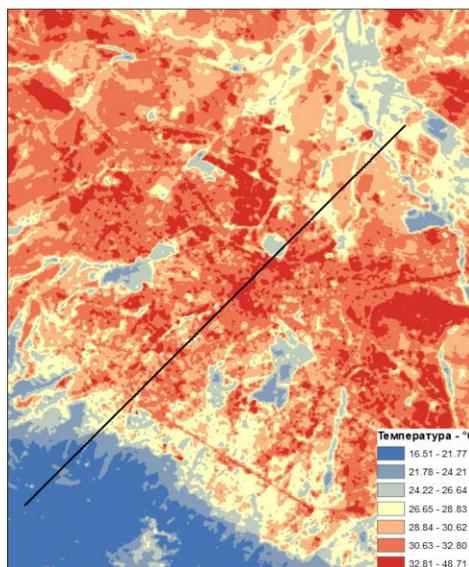
Фиг. IV-9: Линия на профила на температурните стойности с направление северозапад – югоизток по подбрани изображения („Метод 2“) за периода 2011 – 2015 г.



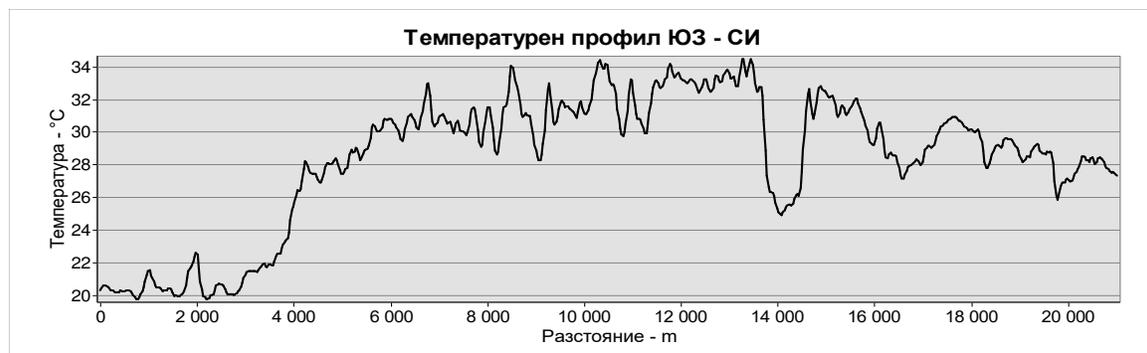
Фиг. IV-10: Профил на температурните стойности с направление северозапад–югоизток по подбрани изображения („Метод 2“) за периода 2011 – 2015 г.

По-интересен е профилът на температурата с направление Юг-Север. Визуално личи по-високата температура в северната част на града спрямо южната. Това се дължи на южните квартали разположени в полите на Витоша планина. Те се отличават с

ниско строителство, липса на големи антропогенни обекти и наличие на повече растителност. Температурният профил на следващата графика започва от планината където температура се движи около 20 °С преди да достигне до ярко изразен клиф на границата с града, където температурата рязко се покачва до 28 °С. След това личи бързо нарастване до 30 °С преминавайки през застроената долна част на Витоша. След околоръстното шосе температурата плавно се покачва достигайки над 33 °С в центъра на града и над 34 °С в индустриалната зона на север преди на премине през типична студена зона породена от парковото пространство на „Централни софийски гробища“, където температурата пада до 25 °С. След това температурният профил следва плавно понижение от 33 °С до около 30 °С на границата с извънградската част и продължава плавно понижението извън града до около 28 °С.

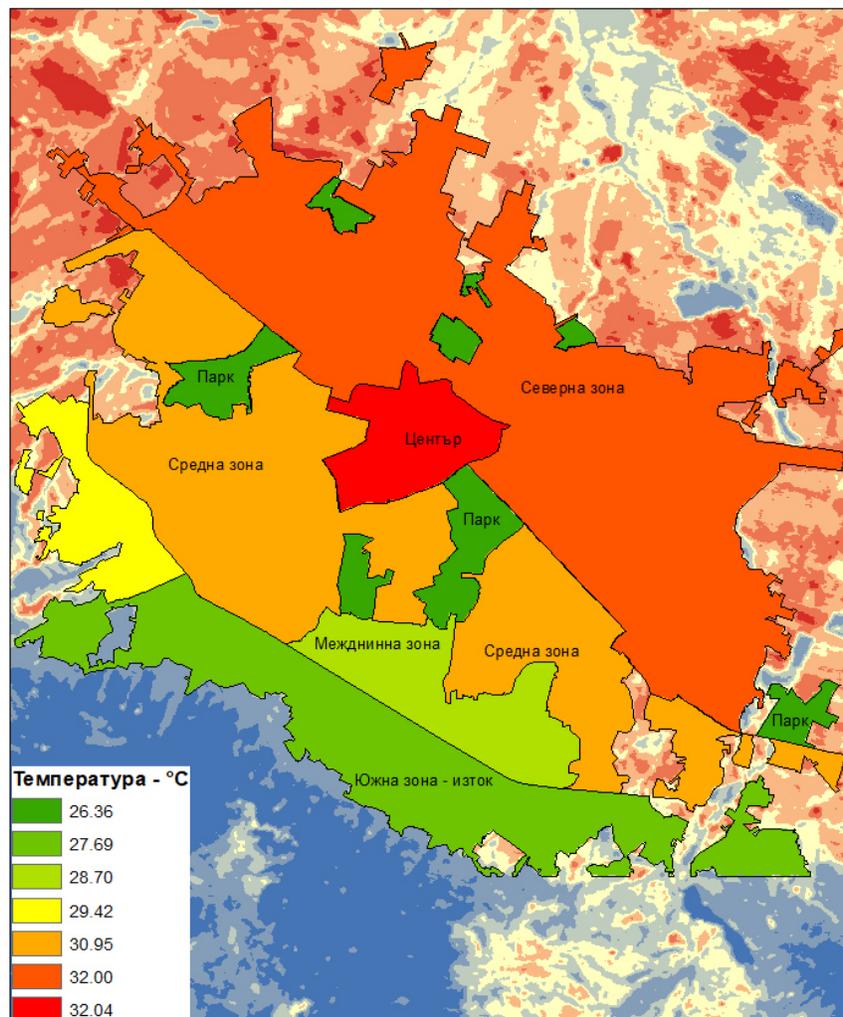


Фиг. IV-11: Линия на профила на температурните стойности с направление югозапад–североизток по избрани изображения („Метод 2“) за периода 2011 – 2015 г.



Фиг. IV-12: Профил на температурните стойности с направление югозапад–североизток по избрани изображения („Метод 2“) за периода 2011 – 2015 г.

За да изследваме повишението на температурата с отдалечаване от планината разделихме градската територия на няколко зони. За целта използвахме площни обекти означаващи границите на кварталите в града и получените LST след осредняване на стойностите за периода 2011–2015 г. В двете най-южни зони попадат кварталите разположени между Витоша планина и ул. „Околовръстен път“. В междинната зона граничеща с част от „Южна зона – Изток“ попадат няколко квартала, в които все още има значително участие на незастроени площи. Зоната разположена в средната част на града обхваща кварталите между кв. „Овча купел“ и кв. „Младост“. В следващата зона попадат кварталите по линията кв. „Люлин“ – кв. „Дружба“ и северно от тях. В отделни зони попадат кв. „Център“ и по-големите градски и гробищни паркове. За всяка зона изчислихме средната стойност на температурата. На следващите графики се вижда повишението на температурата в града от Юг на Север с над 4 °С.



Фиг. IV-13: Зониране на повишаването на LST от юг на север по изображения за периода 2011 – 2015 г.



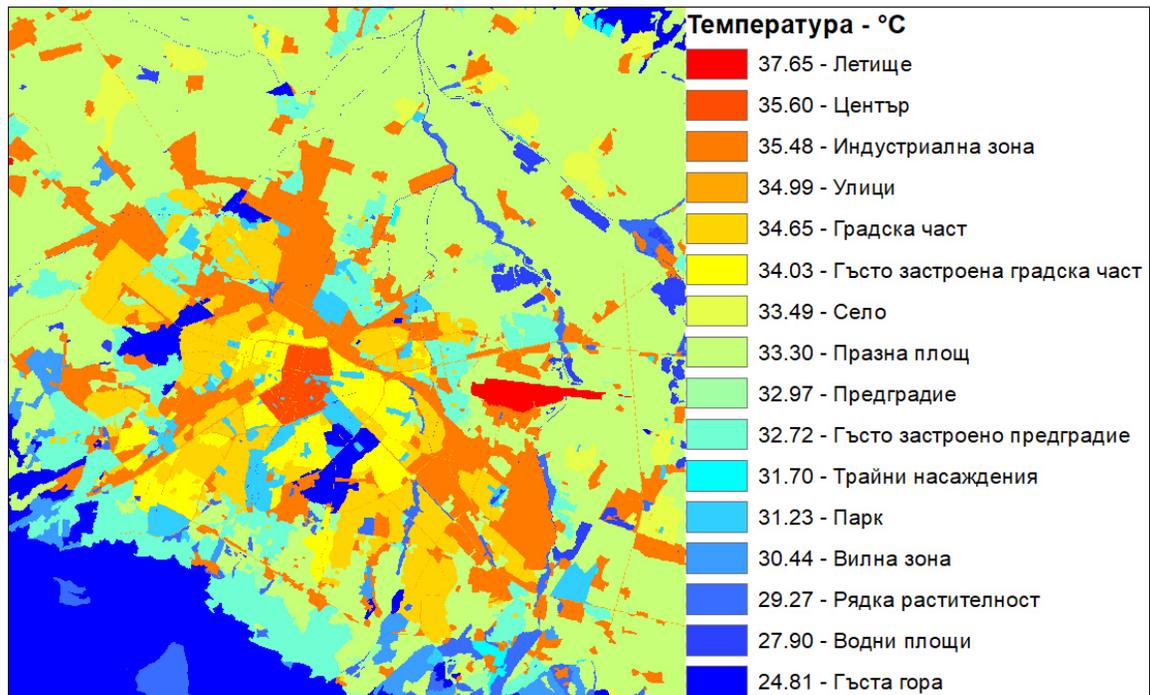
Фиг. IV-14: Изменение на стойностите на LST по зони с направление юг-север.

2.3. Температура на земната повърхност според типа земно покритие.

За да оценим температурата на повърхността по този аспект извършихме визуална класификация на изследваната територия според вида на постилащата повърхност, височината и гъстотата на застрояване, наличието на растителност. Така са отделени общо 16 типа земно покритие:

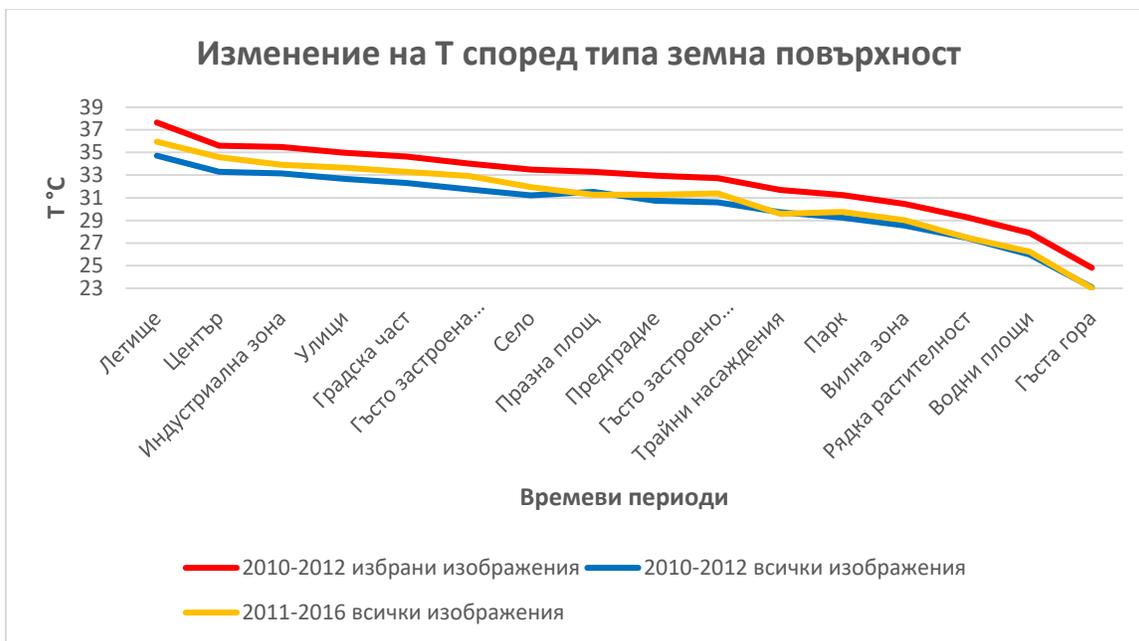
- Център – масивно строителство характерно за центъра на града. Гъсто застроени, долепени сгради образувачи непрекъснатост по протежение на улиците;
- Гъсто застроена градска част – предимно високо строителство с малко отстояние между постройките;
- Градска част – високи сгради с голямо свободно пространство помежду им;
- Гъсто застроено предградие – гъсто застроени площи с предимно ниско строителство;
- Предградие – ниско строителство включващо индустриални обекти и по-голямо отстояние спрямо предходния клас;
- Индустриална зона – предимно индустриални обекти и почти липса на растителност;
- Вилна зона – разредено ниско строителство със значително присъствие на растителност;
- Парк – гъста растителност примесена с антропогенни обекти;
- Село – подобно на класа гъсто застроено предградие, но извън обхвата на градската територия;
- Празна площ – площи без строителство и висока растителност;
- Гъста гора – висока растителност без свободни пространства;

- Рядка растителност – висока растителност със свободни пространства.
- Трайни насаждения;
- Водни площи;
- Летище;
- Улици.



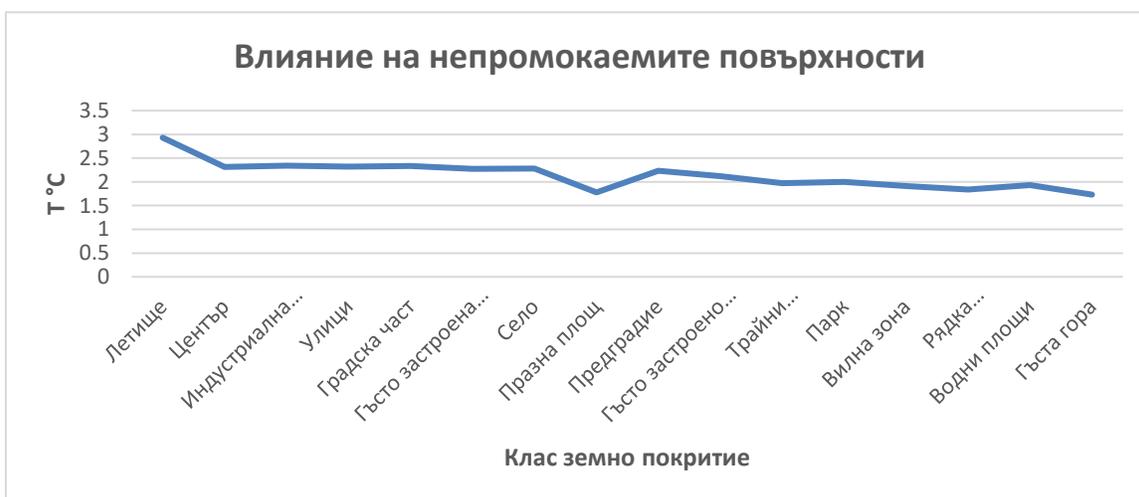
Фиг. IV-15: Температура на земната повърхност базирана на визуална класификация по избрани изображения за периода 2010–2012 г.

На следващата графика е показан хода на температурите по класове. Червената линия представя осреднени стойност от избрани изображения с максимално сходни условия на заснемане за периода 2010–2012 г. Синята линия съдържа осреднени стойности за същия период, но от всички налични изображения в базата. Тези две линии представят един и същ период и се вижда, че с нарастване на максималните температури се засилва влиянието на непромокаемите площи. Интересно е и сравнението между средните стойности за периода 2010–2012 и последната петилетка (2011-2016), като и в двата случая участват всички налични изображения. От графиката се вижда категоричното нарастване на температурата особено в класовете с преобладаващо непромокаеми площи. По-подробно изследване на промените и динамиката на температурата следва в Глава V-2.5.



Фиг. IV-16: Изменение на температурата според типа земна повърхност.

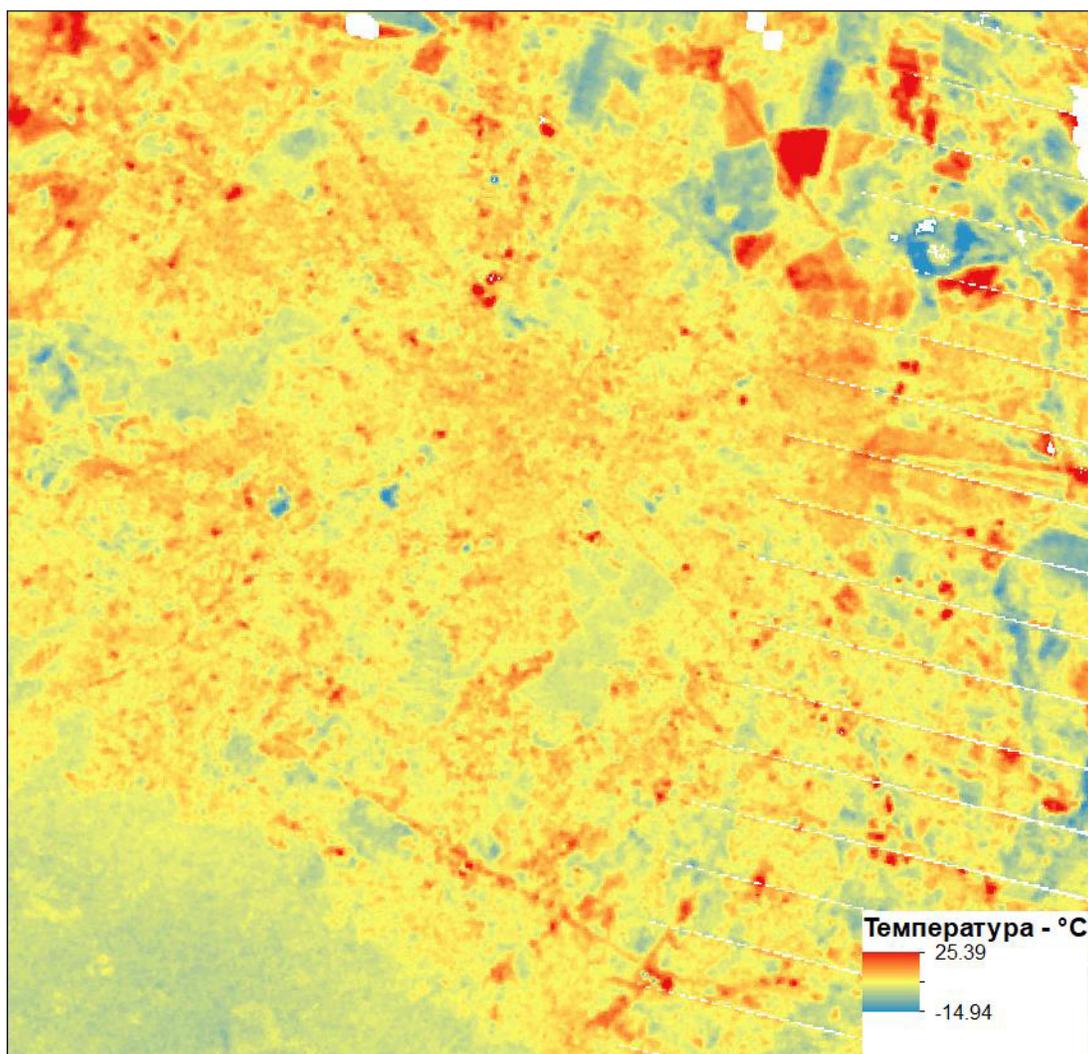
Малко по-рано споменахме, че с нарастване на максималните температури се засилва влиянието на непромокаемите повърхности. За да подкрепим това твърдение на следващата графика е изведена крива получена от разликата между температурата от двете групи изображения за периода 2010–2012 г. Вижда се постепенното намаляване на разликата от класовете с предимно непромокаеми повърхности към класовете със засилено влияние на растителността.



Фиг. IV-17: Влияние на непромокаемите повърхности върху температурата на земната повърхност.

2.4. Оценка на промяната на земното покритие според температурата на земната повърхност.

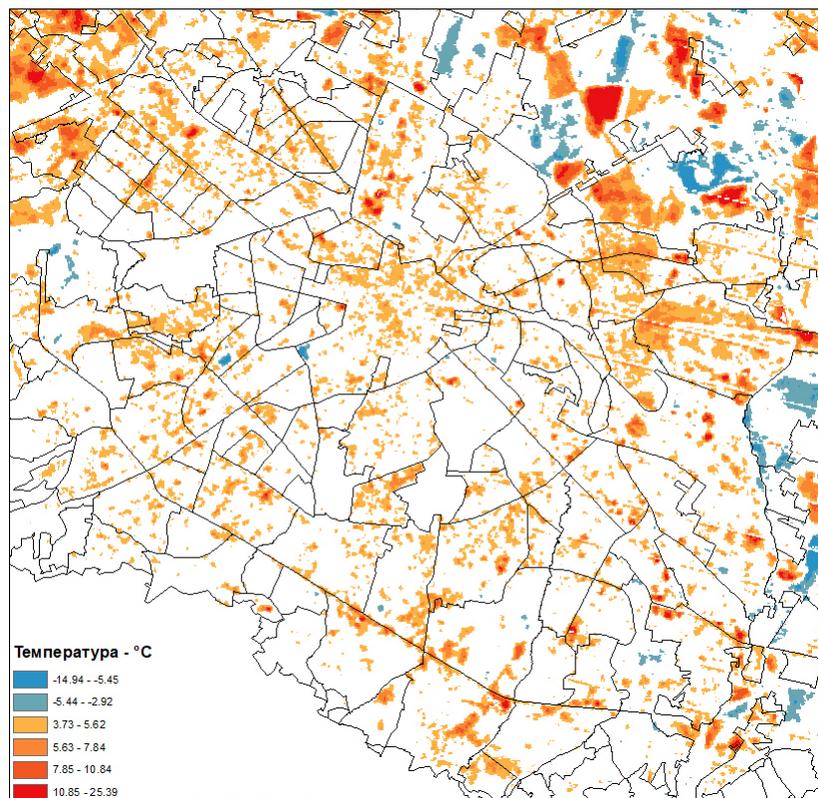
Както вече стана ясно непромокаемите (антропогенни) повърхности се нагряват значително повече от промокаемите (естествени). Имайки предвид разликата в нагряването на различните повърхности топлинните изображения могат да бъдат използвани за откриване на промени в земното покритие. На следващото изображение е представена разликата в температурата между изображения от 2001 и 2015 година. Сините зони означават, че температурата се е понижила, а червените зони подсказват за повишаване на стойността.



Фиг. IV-18: Разлика в температурата на земната повърхност по изображения от 2001 и 2015 г.

На изображението се вижда затоплянето в центъра и други части на града. Освен това се открояват някои силно изразени зони, в които са построени или премахнати обекти. Много ясно изпъква развитието на т.нар. „Южна дъга“. По протежението на тази част от околновръстния път има построени множество индустриални обекти, които повишават температурата.

Горното изображение е допълнително класифицирано, за да се отстранят зоните с минимална разлика в стойностите. По този начин се очертават местата с най-съществени промени. На следващата фигура по-ясно изпъкват зоните с по-съществени промени. Потвърждава се затоплянето в центъра на града и други зони. Зоните с понижени температури са значително по-малко. В рамките на града се забелязват две такива зони в близост до центъра на града, които са следствие на премахване на големи индустриални обекти. На Изток и Североизток са налични множество зони с понижени температури. Само една от тях обаче е следствие от промяна на земното покритие, а именно образуването на нов воден обект. Останалите са предимно обработваеми земи, при които е от значение дали земята е изорана или засята. Именно на изораните ниви се дължат и червените зони в североизточната и северозападната извънградски части, тъй като голата земна повърхност се нагрива значително повече.

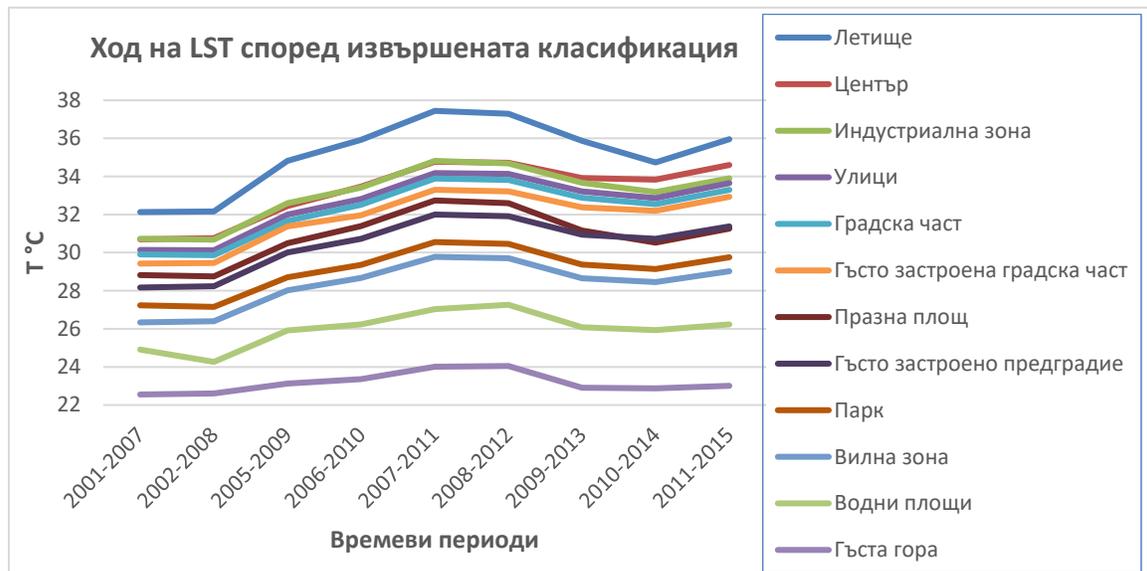


Фиг. IV-19: Зони със значителна разлика в температурата на земната повърхност по изображения от 2001 и 2015 г.

Тъй като факторите влияещи на хода на температура са твърде много няма как да се присвои конкретна стойност или диапазон на температурата към даден тип земна повърхност. Към момента трудно може автоматично да се класифицира земната повърхност само чрез топлинни изображения, а от там да се прави анализ на промените. Въпреки това по хода на температурата на земната повърхност може да се съди за развитието и промяната на повърхността като цяло. В следващата глава от разработката подробно изследваме хода на температурите в рамките на изследвания времеви период.

2.5. Оценка на динамиката на температурата на земната повърхност за изследвания времеви период

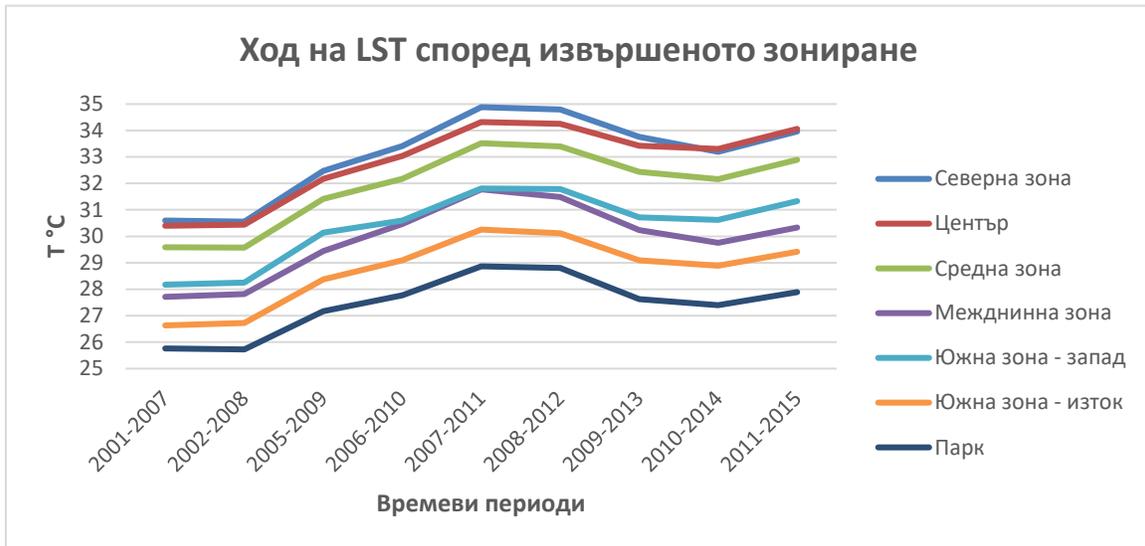
Още от първоначалният визуален анализ на обработените изображения видяхме, че има тенденция към все по-голямо насищане на пикселните стойности. Ако сравняваме две изображения от различни години анализа няма да е коректен, тъй като температурата е доста променлива величина. Затова, работейки с осреднени данни имаме основание да правим общи заключения за промените в градската среда.



Фиг. IV-20: Ход на LST за различни класове земна повърхност по периоди (по избрани изображения, „Метод 2“).

За горната графика са използвани всички изображения осреднени по „Метод 2“. За всеки клас от извършената по рано визуална класификация сме взели стойностите на температурата по периоди. С течение на времето личи постепенно покачване на температурата, което вероятно се дължи на нарастване на непромокаемите повърхности за сметка на зелените площи. За да потвърдим покачването на

температурните стойности ще използваме и границите от извършеното по-рано зонирание от Юг на Север.



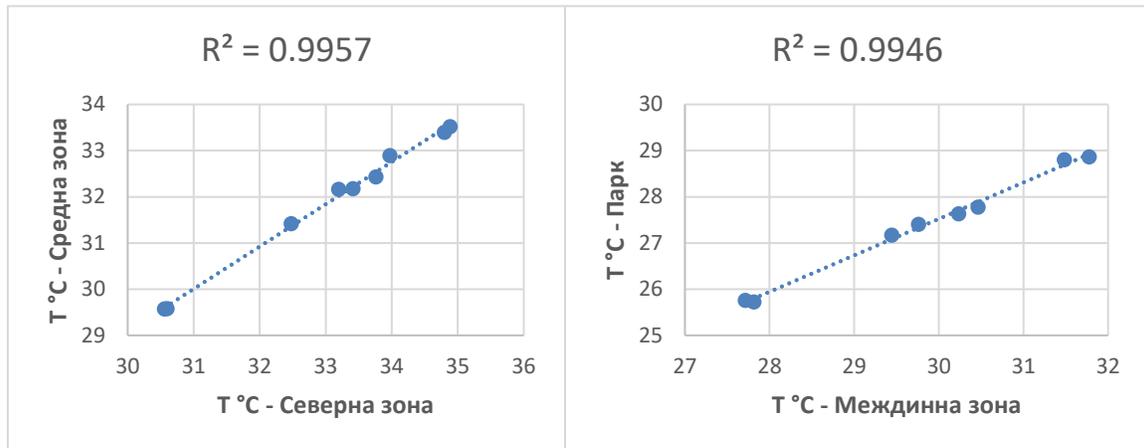
Фиг. IV-21: Ход на LST за различни зони по периоди (по избрани изображения, „Метод 2“).

Горната графика потвърждава нарастването на температурата във всички зони. Абсолютната разлика в температурата между първия и последния период обаче е различна. От следващата графика личи, че зоните с по-малко растителност са повишили температурата повече отколкото тези с наличие на повече растителност. Температурата в централната градска част нараства с над 3.5 °C за целия период, северната и средната зони с около 3.3 °C, докато в междинната зона и „Южна зона – Изток“ стойността нараства с около 2.7 °C. Парковете бележат най-ниско повишение от 2.1 °C.



Фиг. IV-22: Ход на LST по зони.

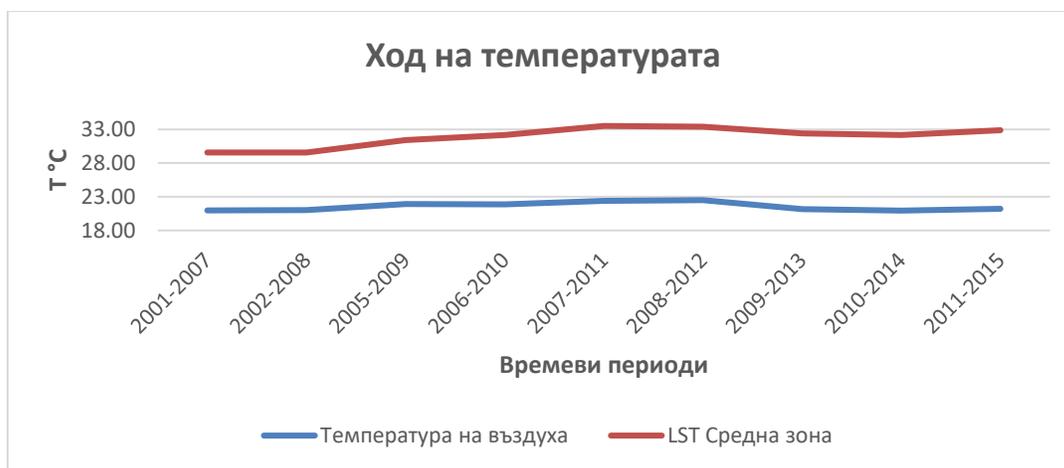
Все пак не може да не забележим изключително сходният ход на температурите за всички зони, въпреки различията на земното покритие. Същото се отнася и за по-горната графика, на която е изобразен хода на температурите според класа земно покритие. Анализирайки динамиката на температурата между всички зони установяваме, че корелационната зависимост между зоните е твърде висока. Най-ниският коефициент между две зони е 0.972.



Фиг. IV-23: Корелационна зависимост между „Северна зона“ и „Средна зона“ (ляво) и „Парк“ и „Междинна зона“ (дясно).

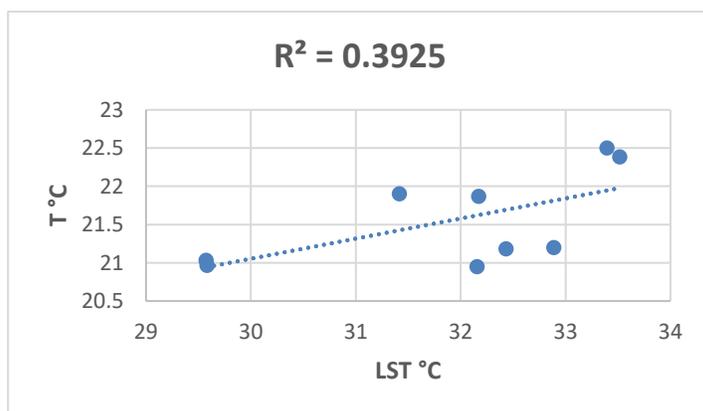
От последните анализи можем да съдим, че нарастването на температурата на земната повърхност по така представените данни не се дължи единствено на промяна на земното покритие и увеличаването на непромокаемите повърхности за сметка на растителността.

Затова анализирахме и температурата на въздуха. За датата на заснемане на всяко изображение участващо в горните анализи извадихме температурата на въздуха към 11 h по данните предоставени от НИМХ-БАН. За сравнение Landsat изображенията са заснети около и малко след 10:30 h местно време. Единствено за 2015 година стойността взехме от уеб сайта “wunderground.com”, като сме записали средната стойност между измерването в 10 и в 12 h. На следващата графика е показано сравнение между динамиката на температурата на въздуха и на LST по данни от „Средна зона“.



Фиг. IV-24: Сравнение между температурата на въздуха в 12 h по данни от НИМХ-БАН и температурата на земната повърхност около 12:00 h местно време по данни от Landsat.

Вижда се, че двете линии следват подобен тренд, което се доказва и от регресионния анализ.

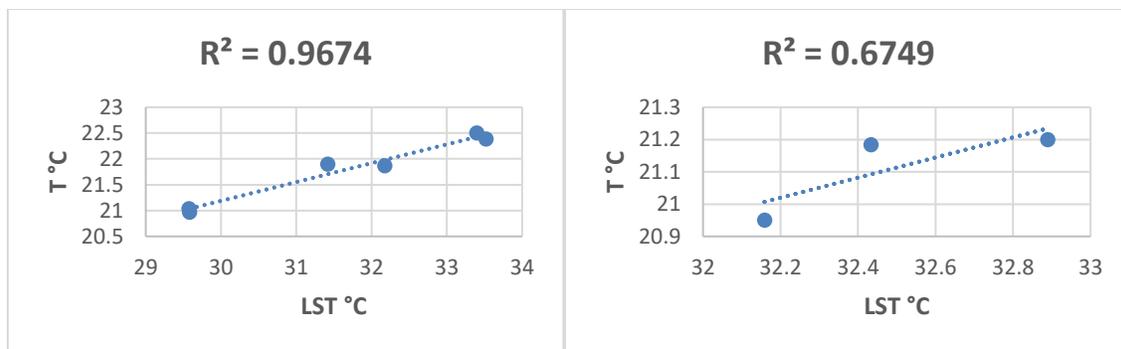


Фиг. IV-25: Корелационна зависимост между температура на въздуха и температура на земната повърхност.

На пръв поглед корелационната зависимост не е задоволителна. Ако анализираме ситуацията по-внимателно ще видим, че всъщност, ако изключим трите точки под тренд линията, то останалите образуват линейна зависимост. Въпросните отделили се точки сами по себе си също изглежда лежат на една права. Това са всъщност последните три групи.

Период	T° на въздуха	LST Средна зона
2001-2007	20.97	29.58
2002-2008	21.03	29.57
2005-2009	21.90	31.42
2006-2010	21.87	32.17
2007-2011	22.38	33.52
2008-2012	22.50	33.40
2009-2013	21.18	32.43
2010-2014	20.95	32.16
2011-2015	21.20	32.89

Табл. IV-3: Стойности на T° на въздуха и LST Средна зона



Фиг. IV-26: Корелационна зависимост между температура на въздуха и температура на земната повърхност: първите 6 периода (ляво) и последни три периода (дясно).

За да се опитаме да оценим нарастването на температурата дължащо се на човешкия фактор ще анализираме и интензитета или магнитута на топлинния остров. Както и по-рано цитирахме това представлява разликата между най-топлата зона в града и базовата извънградска температура. В случая за базова извънградска температура ще използваме два типа повърхност от визуалната класификация – „Празна площ“ и „Гъста гора“. Като най-топла зона от предишните анализи се очерта летище „София“. На следващата графика е представен интензитета на топлинния остров в града.



Фиг. IV-27: Интензитет на градския топлинен остров базиран на две от класифицираните зони (празна площ и гъста гора).

Средно интензитета на ГТО се движи около 8 °C. За да завършим анализа ще оценим процентното нарастване на температурните стойности като използваме периодите с най-висока корелация. От тях ще извадим първите два, тъй като изглеждат по

скоро аномални в сравнение с останалите. Така остават общо четири периода от 2005-2009 до 2008-2012 г. За този седем годишен интервал температурата на въздуха в последната група е с 2.74 % по-висока спрямо първата група. По същия метод интензитета на топлинния остров е по-висок в края на периода с 8.79 % изчислен спрямо клас „Празна площ“, с 13.41 % изчислен спрямо клас „Гъста гора“ или средно 12.16 % по-висок. Ако извадим микроклиматичното влияние на температурата на въздуха от средната стойност ще получим нарастване на температурата на земната повърхност в градската част с 9.42% за периода 2005–2012 година. Това би следвало да бъде нарастването на температурата дължащо се на отнемане на части от парковете за строителство, поява на нови зони със застроени жилищни блокове, поява на нови големи индустриални обекти, съгъстяване на жилищния фонд, подмяна на старо ниско строителство с нови по-големи сгради, вероятно влияние оказват и много други антропогенни фактори съпътстващи безспорния растеж на града, като увеличаването на автомобилния трафик например. В същото време при анализа на промените на земното покритие в града открихме незначителен брой площи с понижаване на температурата, което допълнително подкрепя фактите, че динамиката на температурата в града е в посока постоянно повишаване.

2.6. Заключение

От анализа на обработените изображения можем категорично да потвърдим образуването на градски топлинен остров на повърхността в изследваната територия. Този факт е подкрепен както с визуална оценка, така и с последващ задълбочен анализ на резултатите. Използвани са две метода на осредняване на изображенията. При „Метод 1“ имаме три равни интервала, в които влизат всички налични изображения в базата данни оценени като валидни за включване в анализа, докато при „Метод 2“ са получени 9 интервала на базата на подбрани изображения (по едно за година) при максимално сходни условия на заснемане.

Пространственият модел на топлинния остров в града показва изразено повишаване на температурите от Юг на Север. Температурния профил показва различно проявление по направлението Запад-Изток спрямо направлението Юг-Север. Като цяло топлинният остров се характеризира с хетерогенност, както и с типичните за ГТО клифове, плата, микро ГТО и „хладилни“ острови.

Анализирано е влиянието на типа земно покритие. За целта е изготвена визуална класификация, чрез която изследваната територия е разделена на 16 класа. Безспорно е влиянието на т.нар. „непромокаеми повърхности“ върху повишаването на температурата в града. Топлинните изображения успешно могат да бъдат използвани за откриване на промени в земното покритие чрез времеви анализ. Подробният анализ на данните за целия период на изследване показва постепенно повишаване на температурата в града поради изменението на градската среда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Накрая искам да изкажа своята благодарност към хората, които ми помогнаха в целия процес по реализиране на дисертационния труд и придобиването на научно-образователна степен Доктор. Благодаря на ръководителят на секция „Дистанционни изследвания и ГИС“ проф. д-р Евгения Руменина за пълното съдействие по време на следването ми в академията. Всички книги и лекции на тема дистанционни изследвания от проф. д.т.н. Гаро Мардироян бяха изключително ценни за изграждане на основни теоретични познания. Благодаря и на всички колеги от секция „Дистанционни изследвания и ГИС“, които ми помогнаха със съвети и препоръки. Благодаря на институциите, които ми предоставиха необходимите данни и информация, а именно НИМХ-БАН, ИАОС, ЕСРИ България. Специални благодарности към моят научен ръководител доц. д-р Лъчезар Филчев.

ИЗВОДИ.

1. Разработеният дисертационен труд е по актуална тематика, което се потвърждава от извършената литературна справка. За постигане на целта на изследването са използвани съвременни методи и средства за събиране на информация и анализиране на предмета на изследване.
2. Въведена е основната терминология използвана при подобен тип изследвания и са описани различията в термините отнасящи се до топлинни острови, които понякога се използват еднозначно в научната литература. Базирайки се на извършеният подробен преглед на състоянието на проблема, справката и анализа на наличните спътникови сензори с канал в топлинния диапазон, направената физикогеографска характеристика на района, както и на анализ на наличните метеорологични данни, като най-подходящи за настоящото изследване са определени дневните изображения от Landsat ETM+ и Landsat TIRS с времевият обхват около и след средата на месец юли.
3. След подробният анализ на научната литература по текущата тематика, факторите за образуване на градски топлинни острови, сензорите, приложенията и методите за оценка на LST са набелязани редица нерешени проблеми свързани с разделителната способност на изображенията, условията на заснемане, обхвата на изследванията и др., както и необходимостта и възможните средства за разрешаването им.
4. Оформени са критерии за избор на изображения, а чрез избраният софтуер всички налични данни са обединени в ГИС база данни.
5. Анализирани и изпробвани са методи за извличане на LST стойности по топлинни спътникови изображения, включително атмосферни корекции и

- корекции на излъчвателната способност. Разработена е методология на изследването, която включва общ, теоретичен и физически модел за обработка на топлинни спътникови изображения и извличане на LST стойности. Валидирането на получените резултати спрямо метеорологични измервания, които сме приели са достоверни, показва висока положителна корелационна зависимост.
6. Анализа на резултатите от двата източника, MODIS и Landsat, доказва тяхната приложимост при изследванията на температурата на земната повърхност в различни мащаби. MODIS LST продукта от ниво 3 е използван за оценка на вътрешногодишния ход на температурата на градската повърхност за периода 01.01.2013 – 31.12.2013 г. По-подробен анализ на нейните пространствено-времевите промени е извършен чрез извлечените LST стойности по дневни изображенията от Landsat ETM+ и Landsat TIRS през месеците юли и август за периода 2000 – 2015 г.
 7. Доказано е влиянието на града върху температурата на земната повърхност и наличието на градски топлинен остров, което личи както от визуалния анализ, така и от извършените статистически и пространствени анализи. Типа земно покритие категорично влияе върху модела на температурата на градската повърхност, а изследването на динамиката на температурата за периода 2000 – 2015 г. показва повишаване на температурата на градската повърхност в следствие от нарастване на непромокаемите (антропогенни) площи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Темата е актуална в световен мащаб и е предпоставка за по-широко развитие на подобен тип изследвания в България. Използването на топлинни спътникови изображения е научно направление, което не е достатъчно добре застъпено на национално ниво, но е изключително ценно и със сериозно бъдеще не само за оценка и моделиране на температурата на градската повърхност, но и в редица други приложни области. Ограничаващи фактори в това отношение към момента са сравнително ниската ПРС на този тип данни, обратната пропорционалност между ПРС и ВРС, необходимостта от заснемане на територията в централна проекция и необходимостта от натрупване на дълги времеви серии от данни. Като добра перспектива се очертават проекти като MISTIGRI (MicroSatellite for Thermal Infrared Ground Surface Imaging) и HypsIRI (Hyperspectral Infrared Imager), които са в проучвателен стадий и трябва да имат около 50 m ПРС и време за повторно заснемане между 1 – 5 дни. Също така алтернатива за малки до средни по мащаб проекти са безпилотните летателни апарати.

Имайки предвид изложеното дотук считаме, че използваната терминология при работата с топлинни спътникови данни трябва да бъде обвързана не само с обекта на изследване, но и с целта и методологията. По-конкретно, при изследване на температурата на повърхността в градска среда по спътникови данни, считаме че правилната терминология би следвало да бъде:

- Топлинен остров на градската повърхност (Urban Surface Heat Island, USHI), когато говорим за наличието на по-топла градска повърхност в сравнение със съседните извънградски площи (Rigo, Parlow and Oesch, 2006);
- Температура на градската повърхност (Urban Surface Temperature, UST), когато говорим за извличане на температурни стойности в градска територия по спътникови изображения (Pu *et al.*, 2006);
- Модел на температурата на градската повърхност (Urban Surface Temperature Pattern, USTP), когато говорим за пространствените характеристики на температурата на градската повърхност и образуването на по-топли и по-студени зони в рамките на града.

Анализа на MODIS LST продукта от ниво 3 показва доста точни прогнозни стойности през зимните месеци, но през летните месеци, особено през деня, резултатите не са добри, което се изразява в надценяване на стойността. Резултатите са силно повлияни от земното покритие, тъй като станциите с преобладаващо присъствие на растителност имат по-добри прогнозни стойности (MODIS LST), отколкото станциите с предимно непромокаеми повърхности. Можем да констатираме, че движещата сила за сезонността не е покачването на температурите само по себе си, а осветеността от Слънцето в комбинация с присъствието на непромокаеми повърхности. Все пак, длъжни сме да отбележим, че констатираното влияние на типа земна повърхност е базирано основно на визуален анализ и е необходимо в бъдеще да се извърши по-задълбочено изследване за всеки тип земно покритие, подобно на анализа извършен в Глава III, т. 5.1. Изследваната динамиката на LST показва най-висок интензитет по дневни изображения през лятото, докато през зимата по същите изображения топлинен остров почти не се проявява. От друга страна по нощните изображения топлинният остров се наблюдава по-равномерно, цялогодишно, но с малко по-високи стойности през лятото.

Подробният анализ на модела на температурата на градската повърхност и нейните пространствено-времеви промени е извършен по обработените изображения от Landsat ETM+ и Landsat TIRS. Изображенията са обработени по два метода – RTE и

SC, като вторият се показва като по-успешен с корелационен коефициент 0.83. Основните резултати от анализа са:

- Въпреки по-ниската ПРС на TIRS сензора при него влиянието на града визуално личи по-добре, което се дължи на по-големия динамичен обхват (12 бита срещу 8 за ETM+). В нашият анализ сме използвали изображенията от двата сензора заедно, но като допълнително изследване би било интересно съпоставянето на резултатите помежду им. При осредняване на данните по интервали визуално личи повишаването на температурата на градската повърхност за изследвания период;
- Град София образува повърхностен топлинен остров с типични пространствени характеристики. Температурния профил показва различно проявление по направлението запад-изток спрямо направлението юг-север. Като цяло топлинният остров се характеризира с хетерогенност, както и с типичните за ГТО плата, микро ГТО и „хладилни“ острови. Поради оголеността на земната повърхност в софийското котловинно поле ясно изразен клиф или стръмен температурен градиент на границата с града се наблюдава само от юг, където градската територия граничи непосредствено с Витоша планина. Анализът на пространствения модел на температурата на градската повърхност показва нарастване от юг на север с над 4 °С.
- Извършената визуална класификация групира изследваната територия в 16 класа земно покритие. Осредняването на температурните стойности от изображенията за всеки клас показва нарастване на температурата на повърхността с намаляване на зелените (естествени) площи. Разликата между температурата в центъра на града и най-хладният клас „Гъста гора“ е над 11 °С, а отделни обекти, напр. индустриални, достигат температура над 50 °С.
- Анализът на температурния ход показва, че с нарастване на максималните температури се засилва влиянието на непромокаемите площи. Сравнението на температурния ход за различни периоди показва нарастване на температурата особено в класовете с преобладаващо непромокаеми площи.
- Извършената оценка на промяната на земното покритие по топлинни спътникови данни ясно установява нарастването на непромокаемите площи. По-големи територии с повишени стойности се наблюдават в центъра на града, на Север в кв. „Орландовци“, на Запад в кварталите „Люлин“, „Факултета“, „Овча купел“, на Югоизток по протежение на околновръстното шосе и кв. „Симеоново“, кв. „Хладилника“ между „Южен парк“ и „Ловен парк“, летище София и разположения до него кв. „Левски“. От друга страна единственото

видимо понижение на температурата е следствие от премахнати индустриални обекти. Топлинните изображения успешно могат да бъдат използвани за откриване на промени в земното покритие чрез времеви анализ. В това отношение затруднение представлява голата земна повърхност, която се нагрива подобно на непромокаема площ. Въпреки това възможността за класифициране на земната повърхност по данни в топлинния диапазон, в комбинация с други спектрални диапазони е още едно приложение на топлинните спътникови изображения и предмет на допълнителни научни изследвания.

Оценката на динамиката на температурата на земната повърхност показва повишение във всички класове и зони от извършените класификации. Въпреки по-голямото нарастване на температурата в зоните с преобладаващо непромокаеми площи, можем да съдим, че нарастването на температурата на земната повърхност по така представените данни не се дължи единствено на промяна на земното покритие и увеличаването на непромокаемите повърхности за сметка на растителността, но и на покачването на температурата на въздуха. След финалният анализ на динамиката на температурата на земната повърхност и изваждането на микроклиматичното влияние на температурата на въздуха можем да констатираме повишение на LST с над 9 °C причинено от промяната и развитието на градската среда.

ПЕРСПЕКТИВИ И БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ

Положителните резултати от текущата разработка са предпоставка за последващи изследвания и популяризиране на топлинните спътникови данни в страната. Освен това в дисертационният труд има разработени части, които все още не са публикувани в научната литература. Като добра перспектива за доработване на части от настоящата работа в отделни изследвания можем да поставим 1) по-задълбочен анализ на терминологията по отношение на анализа в топлинния диапазон; 2) разширяване на времевия обхват и мащаба на изследване по данни от MODIS LST; 3) валидиране на топлинните спътникови данни по предварително планирани теренни измервания, както и теренни измервания на излъчвателната способност; 4) включване на допълнителни сензори в анализа и валидация на многоканални алгоритми. Също така в бъдеще имаме интерес към използване на топлинните спътникови данни, като допълнителна средство за класифициране и картографиране на земната повърхност, извършване на топлинен анализ на сгради, оценка, а ако излезем от рамките на града и анализ на посивите в селското стопанство, помощ при природни бедствия, напр. локализиране на пожари. Изброеното дотук неизменно включва използването на безпилотни летателни апарати и Уеб-ГИС технологии.

ПРИНОСИ

1. Предложени са основни термини при анализа на температурата на повърхността в градска среда, като освен това е въведен термина „Модел на температурата на градската повърхност (Urban Surface Temperature Pattern, USTR)“;
2. За пръв път в българската научна литература е направен и публикуван обстоен преглед на методите за извличане на температура на земната повърхност по спътникови данни.
3. Създаден и апробиран за територията на гр. София е модел за обработка на спътникови изображения регистрирани в топлинния диапазон, който приема не само изображения от Landsat, но топлинни изображения в широк смисъл.
4. Доказана е взаимовръзката между промените на земното покритие в гр. София и промените в температурата на градската повърхност в рамките на изследваната територия;
5. Констатирана е ясно изразена сезонност в данните от MODIS LST продукта от ниво 3, като движещата сила за сезонността не е покачването на температурите само по себе си, а осветеността от Слънцето в комбинация с присъствието на непромокаеми повърхности в урбанизирани територии.
6. За първи път в българската научна литература е доказано присъствието на градски топлинен остров по анализ на спътникови изображения.
7. Доказано е нарастването на температурата на градската повърхност за периода 2000 – 2015 г., причинено от промяната и развитието на градската среда. Освен това е констатирано нарастване на температурата на градската повърхност в изследваната територия от юг на север.

Основните резултати са публикувани в следните издания:

Yanev, I. and L. Filchev. (2017) Satellite sensors used in thermal remote sensing. Aerospace research in Bulgaria, No. 29. Publisher: SRTI-BAS, p-ISSN 1313-0927. (подадена за рецензия)

Yanev, I. and L. Filchev. (2017) Assessment of the land surface temperature dynamics in the city of Sofia using Landsat satellite data. Aerospace research in Bulgaria, No. 29. Publisher: SRTI-BAS, p-ISSN 1313-0927. (подадена за рецензия)

Янев, Ив. Методи за определяне на температурата на земната повърхност от топлинни инфрачервени спътникови изображения, В: Сборник доклади от 12-та конференция с международно участие SES'2016, 02-04 ноември 2016 г., София, ИКИТ-БАН, стр. 177-187.

Yanev, I. and L. Filchev. (2016) A comparative analysis between MODIS LST level-3 product and in-situ temperature data for estimation of urban heat island of Sofia. Aerospace research in Bulgaria, No. 28, pp 77-92. Publisher: SRTI-BAS, p-ISSN 1313-0927.

Yanev, I. and L. Filchev. (2013) Land surface temperature of urban areas using thermal remote sensing data: state of the art, problems and perspectives, В: Сборник доклади от 9-та конференция с международно участие SES'2013, 20-22 ноември 2013 г., София, ИКИТ-БАН, стр. 357-362.

Основните резултати са докладвани на следните международни и национални мероприятия:

Доклад пред научно мероприятие в чужбина или пред международно научно мероприятие у нас

Yanev, I. and L. Filchev. (2013) Land surface temperature of urban areas using thermal remote sensing data: state of the art, problems and perspectives, В: Сборник доклади от 9-та конференция с международно участие SES'2013, 20-22 ноември 2013 г., гр. София

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА:

Andreev, V., Syrakov, D., *et al.* (no date) 'Air Quality of Sofia – Meteorological Aspects'. Ecology of the City of Sofia Species and Communities in Urban Environment.

Andreev, V., Ch., B., *et al.* (no date) 'Climate and Human Comfort of Sofia'. Ecology of the City of Sofia Species and Communities in Urban Environment.

Блъскова, Д. (1983) 'Климат и микроклимат на София'. Изд. на БАН.

Векилска, Б. (2011) 'Обща климатология'.

Велев, С. (2010) 'Климат на България'.

Стефанов, С. (1991) 'Климатът на България (Моногр.)'.

Топлийски, Д. (2006) 'Климат на България'.

Христов, П. (1959) 'Климат на Витоша'.

Ценкова, А., Иванчева, Ю. and Виденов, В. (2002) 'Върху климата на града на примера на някои български градове', in. Пловдив: XXX Конференция по въпросите на обучението по физика

Baldrige, A. M. *et al.* (2009) 'The ASTER spectral library version 2.0', *Remote Sensing of Environment*. Elsevier Inc., 113(4), pp. 711–715. doi: 10.1016/j.rse.2008.11.007.

Baumann, P. R. (2009) 'Urban heat island lesson', *Geocarto International*. Department of Geography, State University of New York, College at Oneonta, Oneonta, NY 13820, United States, 24(6), pp. 473–483. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70450228492&partnerID=40&md5=4c0d3a5b2699457b72bd79a36133c148>.

Berk, A. *et al.* (2011) 'MODTRAN 5.2.1 USER'S MANUAL', pp. 1–69.

Brunsell, N. a and Gillies, R. R. (2002) 'Incorporating surface emissivity into a thermal atmospheric correction', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(12), pp. 1263–1269.

Cao, G. *et al.* (2012) 'Analysis on the spatial distribution of urban heat island with downscaled FY-3A VIRR land surface temperature', in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, EORSA 2012*. LREVCS, China Meteorological Administration, Beijing, China (2nd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, EORSA 2012), pp. 36–40. Available

at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84866787542&partnerID=40&md5=077e0ef51ba10bc723faa7247a7c5748>.

Chudnovsky, A., Ben-Dor, E. and Saaroni, H. (2004) 'Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements', *Energy and Buildings*. Remote Sensing and GIS Laboratory, Department of Geography, Tel-Aviv, Israel, 36(11), pp. 1063–1074. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-4344650179&partnerID=40&md5=dd3eb72d28a940c89e41b56ff3e5b4ae>.

Flynn, L. P., Harris, A. J. L. and Wright, R. (2001) 'Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+', *Remote Sensing of Environment*, 78(1–2), pp. 180–193. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00258-9.

Hall, P. P. (2007) 'Thermal Infrared Remote Sensing', pp. 1–39.

Jacobs, J., Oke, T. . and Rouse, W. R. (1997) 'W. G. Bailey, Timothy R. Oke, and Wayne R. Rouse (eds.), The Surface Climates of Canada', *Climatic Change*, 45(2), pp. 375–377. doi: 10.1023/A:1005563728155.

Jimenez-Munoz, J. C. *et al.* (2009) 'Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), pp. 339–349. doi: 10.1109/TGRS.2008.2007125.

Jiménez-Muñoz, J. C. and Sobrino, J. A. (2003) 'A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data', *Journal of Geophysical Research*, 109, p. 8112. doi: 10.1029/2004JD004804.

Kovats, R. S. and Hajat, S. (2008) 'Heat stress and public health: a critical review.', *Annual review of public health*. United States, 29, pp. 41–55. doi: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.

Kuenzer, C. and Dech, S. (2013) 'Theoretical Background of Thermal Infrared Remote Sensing', in Kuenzer, C. and Dech, S. (eds) *Thermal Infrared Remote Sensing SE - 1*. Springer Netherlands (Remote Sensing and Digital Image Processing), pp. 1–26. doi: 10.1007/978-94-007-6639-6_1.

Lo, C. P., Luvall, J. C. and Quattrochi, D. A. (1997) 'Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect', *International Journal of Remote Sensing*. Department of Geography, University of Georgia, Athens, GA 30602, United States, 18(2), pp. 287–304. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0030917979&partnerID=40&md5=923e2896bf6ccecfe2e3450183e7137b9>.

McMillin, L. M. (1975) 'Estimation of sea surface temperatures from two infrared window

measurements with different absorption', *Journal of Geophysical Research*, 80(36), pp. 5113–5117. doi: 10.1029/JC080i036p05113.

Outcalt, S. I. (1972) 'A Reconnaissance Experiment in Mapping and Modeling the Effect of Land Use on Urban Thermal Regimes'.

Pease, R. W., Lewis, J. E. and Outcalt, S. I. (1976) 'URBAN TERRAIN CLIMATOLOGY AND REMOTE SENSING', 66(469), p. 13.

Pu, R. *et al.* (2006) 'Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval', *Remote Sensing of Environment*. State Key Lab of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China, 104(2), pp. 211–225. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33748155329&partnerID=40&md5=4c865c2c2b84d5cdf250c768a30e579c>.

Qin, Z., Karnieli, a. and Berliner, P. (2001) 'A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region', *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), pp. 3719–3746. doi: 10.1080/01431160010006971.

Quattrochi, D. A. and Luvall, J. C. (1997) 'High Spatial Resolution Airborne Multispectral Thermal Infrared Data to Support Analysis and Modeling Tasks in EOS IDS Project ATLANTA'. Available at: <http://wwwghcc.msfc.nasa.gov/atlanta/>.

Rigo, G., Parlow, E. and Oesch, D. (2006) 'Validation of satellite observed thermal emission with in-situ measurements over an urban surface', *Remote Sensing of Environment*. Institute of Meteorology, Climatology and Remote Sensing, University of Basel, Switzerland, 104(2), pp. 201–210. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33748061966&partnerID=40&md5=4a93b79d08f0e1254ce38335135e5217>.

Roth, M., Oke, T. R. and Emery, W. J. (1989) 'Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology', *International Journal of Remote Sensing*. Atmospheric Science Programme, Department of Geography, The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada V6T 1W5, 10(11), pp. 1699–1720. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0024856054&partnerID=40&md5=c55608af02138ad5a5b5f7767b8a99e2>.

Sobrino, J. *et al.* (2013) 'Review of High Resolution Thermal Infrared Applications and Requirements: The Fuegosat Synthesis Study', in Kuenzer, C. and Dech, S. (eds) *Thermal Infrared Remote Sensing SE - 10*. Springer Netherlands (Remote Sensing and Digital Image Processing), pp. 197–214. doi: 10.1007/978-94-007-6639-6_10.

Stathopoulou, M. and Cartalis, C. (2009) 'Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation', *Remote Sensing of Environment*. Department of Physics, Division of Environmental Physics and Meteorology, University of Athens, University Campus, Building PHYS-V, GR 157 84 Athens, Greece, 113(12), pp. 2592–2605. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70349968086&partnerID=40&md5=162cf3f1ff5cbdf52e89014e2d9bf3da>.

T.R.Oke (1987) *Boundary Layer Climates*.

Voogt, J. A. (2004) 'Urban heat islands: hotter cities'.

Voogt, J. A. and Oke, T. R. (2003) 'Thermal remote sensing of urban climates', *Remote Sensing of Environment*. Department of Geography, University of Western Ontario, London, Ont. N6A 5C2, Canada, 86(3), pp. 370–384. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0141460784&partnerID=40&md5=3ca0e5ded3317e4083c6f42c0aad9e67>.

Weng, Q. (2009) 'Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp. 335–344. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.

Yeon-Hee, K. and Jong-Jin, B. (2002) 'Maximum urban heat island intensity in Seoul', *Journal of Applied Meteorology*. Boston: American Meteorological Society, 41(6), pp. 651–659. Available at: <http://search.proquest.com/docview/224631553?accountid=26415>.

Zakšek, K. and Oštir, K. (2012) 'Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis', *Remote Sensing of Environment*. University of Hamburg, Institute of Geophysics, Bundesstrasse 55, D-20146 Hamburg, Germany, 117, pp. 114–124. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84855446968&partnerID=40&md5=b9e9935ac78a3a0ccedfc668ad02e5a9>.

Zhan, W. *et al.* (2013) 'Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats', *Remote Sensing of Environment*. International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China, 131, pp. 119–139. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84872463262&partnerID=40&md5=09c97cf7d0cb1834c591da604dd457cf>.

Zhiwei, Y., Huili, G. and Wenji, Z. (2009) 'Subpixel urban area thermal pattern analysis using ASTER and SPOT-5', in *2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing, China (2009 Joint Urban Remote Sensing Event). Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70350712928&partnerID=40&md5=196ebc8fe265e3178141f77ac14af3ee>.

Zhou, J. *et al.* (2011) 'Maximum nighttime urban heat Island (UHI) intensity simulation by integrating remotely sensed data and meteorological observations', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Institute of Geo-Spatial Information Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China, 4(1), pp. 138–146. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79953112391&partnerID=40&md5=31e78334fb4f69ee8b8474242fc788d6>.

ASTER Spectral Library, <http://speclib.jpl.nasa.gov/>, *последно посетен ноември 2017.*

MODIS UCSB Emissivity Library, <http://www.icesb.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>, *последно посетен ноември 2017.*

Atmospheric Correction Parameter Calculator, <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>, *последно посетен ноември 2017.*