



КАТЕДРА:

ГЕОПРОСТРАНСТВЕНИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ

Мартин Борисов Илиев

**МОРФОЛОГИЧНА ДИФЕРЕНЦИАЦИЯ И ЗОНИРАНЕ НА
УРБАНИЗИРАНИТЕ ТЕРИТОРИИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА
ГРАДСКОТО ПЛАНИРАНЕ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА
ГЕОПРОСТРАНСТВЕНИ ТЕХНОЛОГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд

За присъждане на образователна и научна степен „Доктор“

Професионално направление 4.4 Науки за Земята

Научна специалност „Картография (вкл. Тематично географско картографиране –
Географски информационни системи)“

Научен ръководител:

Доц. д-р Стелиян Димитров

Научно жури:

Проф. д-р Стоян Недков

Проф. д-р Боян Кулов

Доц. д-р Биляна Борисова

Доц. д-р Александър Гиков

Доц. д-р Евгения Сарафова

**София
2024**

Дисертационният труд съдържа 162 страници, от които 142 страници основен текст и 20 страници приложения. Дисертационният труд включва 73 фигури, 17 таблици и 20 приложения. Списъкът на използваните източници обхваща 213 заглавия, от които 191 научни разработки на английски език и 22 източника от интернет.

Дисертационният труд е обсъден на заседание на катедра „Геопространствени системи и технологии“ към Геолого-географски факултет на Софийски университет „Св. Климент Охридски“, състояло се на 08.07.2024г. и е насочен за публична защита пред научно жури в състав:

1. Проф. д-р Стоян Недков
2. Проф. д-р Боян Кулов
3. Доц. д-р Биляна Борисова
4. Доц. д-р Александър Гиков
5. Доц. д-р Евгения Сарафова

Благодарности

На първо място, бих искал да изразя дълбоката си признателност към моя научен ръководител, доц. д-р Стелиян Димитров, за безценната подкрепа през годините, за възможностите, които ми предостави да се развивам като експерт, и за всичко, което научих под негово ръководство.

Специални благодарности изказвам на проф. д-р Антон Попов, който успя да ми предаде страстта и интереса към науката и ме научи да чета и следя научното развитие в сферата, в която се развивам.

Изключително съм благодарен на моя приятел и колега, гл. ас. д-р Леонид Тодоров, който ме научи на много важни неща и беше мой ментор в първите ми професионални стъпки в ГИС.

Изразявам своята благодарност към доц. д-р Биляна Борисова, както и към преподавателите от катедра "Геопространствени системи и технологии" към Геолого-географския факултет на Софийския университет "Св. Климент Охридски", за техните ценни съвети и незаменима подкрепа.

Накрая, но не на последно място, бих искал да благодаря на моята прекрасна съпруга, Елена, и семейството ми за тяхната непрестанна подкрепа, любов и разбиране през този предизвикателен, но важен период от живота ми.

1. УВОД.....	1
1.1 Актуалност на темата	1
1.2. Цел на изследването	1
1.3. Обект на изследването.....	2
1.4 Предмет на изследването	2
1.5 Задачи.....	2
2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧНА ОСНОВА	3
2.1 Градска морфология	3
2.2 Геопространствени данни описващи градската форма	3
2.3 Геопространствени технологии в изследването на градското пространство	4
3. КОНЦЕПЦИЯ ЗА ИНТЕГРИРАН ЦИФРОВ ПРОСТРАНСТВЕН МОДЕЛ НА УРБАНИЗИРАНОТО ПРОСТРАНСТВО И НЕГОВИТЕ МОРФОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ.....	5
3.1 Пространствено моделиране на урбанизираното пространство чрез въздушна фотограметрия и БЛС	6
3.2 Пространствено моделиране на урбанизираното пространство чрез наземно лазерно (LiDAR) сканиране	7
3.3 Цифров модел на моделираната територия и характеристика на нейната морфология.....	9
4. ПРИЛОЖНИ АСПЕКТИ НА ГЕОИНФОРМАЦИОННИЯ МОДЕЛ ЗА ГРАДСКАТА СРЕДА И НЕЙНАТА МОРФОЛОГИЯ	12
4.1 Изследване на ефекта на градската морфология върху градският топлинен остров на повърхността (ГТОП).....	13
4.1.1 Локално климатично зонирание (Local Climate Zoning) на база земно покритие и особености на градската морфология	15
4.1.2 ГТО на повърхността в границите на урбанизираното пространство на град София	22
4.1.3 Детайлно изследване на ГТО на повърхността в границите на ж.к. Люлин (град София)	26
4.2 Оценка на соларен потенциал за покривни пространства на жилищни сгради в ж.к. Люлин (град София)	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
Приноси на научното изследване:	37
Списък на публикациите по темата на дисертационния труд:.....	37
Литература	38
Приложения	41

1.УВОД

1.1 Актуалност на темата

Значението и ролята на съвременните геоинформационни технологии през последните години непрекъснато нараства, като в някои области, включително в планирането и управлението на урбанизираните територии, те се превръщат не само в основен инструмент за информационно осигуряване, но и в среда за моделиране и симулиране на пространственото и функционално поведение на геосистемите, обект на процедурите по планиране и управление. В практиката все повече се налагат подходите на вземане на решения, базирани на данни и информация, като в това отношение градовете изключително разчитат на подходите, методите и инструментите на геопропространствените технологии. Те осигуряват не само изключително ценна пространствено реферирана информационна основа, но и предлагат иновативни и интуитивни подходи за геосистемното разбиране и решаване на най-съществените проблеми на нашето съвремие. Това са проблемите, свързани с функционалността на територията, с опазването на околната среда, с пространственото разпределение на икономическите и социални дейности, ускорената урбанизация, с нуждата за устойчиво разработване и усвояване на природните ресурси и още много други. Геопропространствените технологии позволяват събирането и организирането на геоданните, свързани с подобни проблеми, и улесняват разбирането на тяхното пространствено и геосистемно асоцииране, като същевременно предоставят мощни инструменти за генериране, анализ и синтез на необходимата информация за тяхното разрешаване. Нещо повече, благодарение на ускореното развитие на дистанционните методи и безпилотните летателни системи, днес процедурите по планиране и управление на градските системи могат да разчитат на данни и информационни ресурси с безпрецедентна времева и пространствена резолюция, която позволява ориентирането и таргетирането на планирането да се насочи към все по-малки пространствени единици и места. По този начин се осигурява необходимата информация, която пряко отразява качеството на живот и непосредствените дейности в урбанизираните територии, което от своя страна позволява същите да се ориентират по-ефективно към решаването на реалните проблеми на местните общности в условията на променяща се и динамична география.

1.2. Цел на изследването

Целта на настоящото изследване е да се създаде концепция за проектиране и разработване на пространствен (географски) модел, който да позволи извършването на научно обоснована морфологична диференциация и зонирание на градските територии за целите на определени аспекти на градското планиране, чрез интегрираното приложение на съвременни геоинформационни решения. Целта на изследването включва тестване на пространствения цифров модел в две предварително дефинирани области на приложение:

- 1) Създаване на модел за отразяване на градската морфология в изследването и картографирането на ефекта на градският топлинен остров на повърхността.

2) Разработване и прилагане на модел за оценка на фотоволтаичният потенциал на покривните конструкции в урбанизираното пространство на София, чрез отчитане на диференцираното влияние на градската морфология.

1.3. Обект на изследването

Обект на изследване е градската морфология. Поради широкия обхват на проблематиката, с която се асоциира понятието градска морфология, е необходимо да се прецизира, че обектът на изследване са тези аспекти на градската морфология, свързани с оценката и диференциацията на формата и пространствената конфигурация на формираните хибридни геосистеми в рамките на урбанизираното пространство на град София.

София, като столицата на България, представлява един от най-динамично развиващи се градове в страната с разнообразни предизвикателства и възможности в областта на урбанизацията и планирането.

Градската морфология на ж.к. Люлин е избрана за фокусен обект на изследване поради нейната специфична урбанистична структура и значимостта ѝ в контекста на градското планиране на София.

1.4 Предмет на изследването

Предмет на изследване е моделирането на градската морфология за определени аспекти на градското планиране. Във фокуса на предмета на изследване попадат геоинформационните технологии като инструменти, с помощта на които да могат да бъдат събрани данни, с достатъчно добра времева и пространствена разделителна способност, спомагащи процесите за моделиране на морфологичния аспект в градските пространства.

1.5 Задачи

За да се постигне главната цел на изследването, са определени следните по-важни задачи:

- Да се формулира концепция за създаване на интегриран геоинформационен модел за отчитане на ефекта на градската морфология върху процесите на планиране и управление на урбанизираните територии
- Да се разработи алгоритъм за осигуряване на адекватни геоданни за пространствено и функционално характеризирание на спецификата на градската морфология
- Да се създаде работеща целева ГИС на моделната територия
- Да се изготвят и приложат специализирани алгоритми за анализ и моделиране на събраните геоданни за градската морфология на София, в съответствие с дефинираните моделни области на приложение, спрямо целта на настоящото изследване
- Въз основа на получените резултати, да се формулира и представи обща концепция за интерпретацията на градската морфология за целите на планирането и управлението на София

2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧНА ОСНОВА

2.1 Градска морфология

Обективното характеризиране и количествено параметризиране на географската и функционалната структура на урбанизираните територии е един от ключовите компоненти на съвременното градско планиране. С особено голямо значение в случая се явяват особеностите на градската морфология, която се свързва с подробното изследване формата и структурата на градската „тъкан“. Към нея също могат да се добавят и пряко свързаните с морфологията физически модели на земното покритие, моделите на земеползване, пространствената конфигурация и съчетанията между естествените и антропогенни елементи на пространството.

Една от отличителните характеристики на градовете и градските (урбанизирани) територии е техният хибриден характер, който отразява комбинацията от естествени и антропогенни обекти и геосистеми, които се изразяват във специфична морфология. Градската морфология е изследване на градските форми, както и на факторите и процесите, отговорни за тяхната трансформация във времето (Olivera, V., 2020). Градската форма се отнася до основните физически елементи, които структурират и оформят града. По-конкретно, това е изучаване на формирането на компонентите на градската тъкан и на взаимоотношенията между тези компоненти, които описват тяхната композиция и конфигурация във времето. Тези сложни явления могат да бъдат анализирани в различни пространствени мащаби и отвъд дисциплинарните граници. Градската морфология представлява интерес за много различни области на изследване. Теоретичните ѝ аспекти са свързани с градската география, историята, архитектурата и пространствената икономика. В приложните си форми тя е важен компонент на градския дизайн, но също така е от значение за развитието, градското планиране и урбанизацията. (Chaiaradia. A., 2019)

2.2 Геопространствени данни описващи градската форма

В днешно време доминиращ характер има така наречената градска морфология, базирана на данни. Тя се фокусира върху използването на големи обеми от данни в изследването на градската форма и пространствените съчетания на елементите, формиращи структурата на урбанизираната територия.

Качествените геопространствени данни играят ключова роля в напредъка на разбирането ни за градската морфология. Те са от решаващо значение, тъй като осигуряват точна и подробна основа за изучаване на физическата структура и разположението на градовете. Подобна основа позволява на изследователите да картографират градската форма, да анализират пространствените модели, да наблюдават промените във времето и да подпомагат устойчивото градско планиране. Тези данни са от съществено значение за вземането на информирани решения относно използването на територията, транспорта и инфраструктурата, като в крайна сметка допринасят за развитието на по-ефективна, устойчива и удобна за живеене градска среда.

През последните години набират популярност изследвания в областта на 3D моделирането на градовете и урбанизираните територии. Технологичната екосистема за

моделирането на географското пространство и неговите компоненти в реален 3D вид е на изключително високо ниво, като това обхваща целият цикъл - придобиването до управлението на данните и приложенията, чрез които тази информация се използва (Dukai et al. 2020, Gil 2020, Vitalis et al. 2020, Lucks et al. 2021, Noardo et al. 2021, Nys and Billen 2021, Santhanavanich and Coors 2021, Virtanen et al. 2021, Wysocki et al. 2021, Biljecki et al. 2021b)

3D моделите на градове поддържат представяне както на геометрията, така и на атрибутивния сегмент на обектите. За всяка 3D сграда отделните повърхности могат да бъдат допълнени със семантична информация. Тези модели на градове могат да бъдат моделирани по много различни начини, основани предимно на метода за тяхното генериране. (Labetski, 2022)

Проблем в някои от изследванията е, че значителна част от анализа разчита на данни, които често не са точни или нямат висока разделителна способност или качество, например няма отделни сгради или на разположение е само модел на повърхността с груба пространствена разделителна способност или ниска точност Touchaei and Wang (2015), Xu et al. (2017), Ren et al. (2020), Li et al. (2020), Fibaek et al. (2021), Zhu et al. (2022). В тази разработка е извършен анализ, който е усъвършенстван както по отношение на мащаба (географско покритие), така и по отношение на детайлите (отделни сгради с точна геометрия).

2.3 Геопространствени технологии в изследването на градското пространство

През последните десетилетия технологичното развитие улесни значително събирането на безпрецедентна информация за процесите, които се случват в градовете. От сателитните изображения, смартфоните и социалните медии до използването на най-съвременни геопространствени технологии – всички те допринесоха за така наречената „революция на големите данни“. Всичко това дава възможност на специалистите в областта на планирането и изследването на градската среда, да вземат по информирани решения, като същевременно разгръщат сложността на градските проблеми. (Allam et al. 2022; Christmann and Schinagl 2023). Следователно, ако използването на технологиите и данните е добре планирано, може да доведе до по-добри решения, по-високо качество на живот и устойчиво градско развитие. (H. Soltanifard et al. 2024)

В контекста на разглежданата проблематика в изследването на градската морфология, най-подходящият начин за събиране на данни са дистанционните наблюдения. Въпреки че технологиите за дистанционно наблюдение имат много ограничения и могат да бъдат доста скъпи, те все пак са най-ефективният начин за събиране на данни. (Furjani et al. 2020) Дистанционните наблюдения играят важна роля при изграждането и разработването на дигитални модели на градовете. Все повече се използват технологии, разработени за реконструкция на 3D градски модели, като фотограметрия, LiDAR, сателитни, въздушни и наземни заснемания. Съществуват обаче някои ограничения на данните от дистанционно наблюдение в процеса по дигитализация на градовете и градските райони, като например част от територията остава невидима

(скрита) за сензорите. Поради това събирането на данни трябва да бъде комплексен подход от различни методи. (Furjani et al. 2020) Наблюдаването на подобни проблеми намалява, вземайки предвид последните постижения в областта на дистанционните наблюдения и геопространствени технологии, както и краудсорсинг данните. (H. Soltanifard et al. 2024)

Комбинирането на различни техники на събиране на данни позволява на изследователите да създават изчерпателни и точни набори от данни, улесняващи задълбочените анализи на градската морфология и подпомагащи вземането на информирани решения в областта на градското планиране.

3. КОНЦЕПЦИЯ ЗА ИНТЕГРИРАН ЦИФРОВ ПРОСТРАНСТВЕН МОДЕЛ НА УРБАНИЗИРАНОТО ПРОСТРАНСТВО И НЕГОВИТЕ МОРФОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ

Основа цел на настоящото изследване е да се създаде концепция за проектиране и разработване на пространствен (географски) модел, който да позволи извършването на научно обоснована морфологична диференциация и зонирание на градските територии за целите на определени аспекти на градското планиране. Тази цел се базира на подход за интегрираното приложение на геопространствени технологични решения, които позволяват подробно цифрово репликиране на градската среда и морфология и създаване на информационна среда за изследване на комплексни проблеми в нейното развитие и адаптация към променящите се географски условия.

Формулирана е обща концептуална рамка на разработеният в рамките на настоящото дисертационно изследване геоинформационен модел, който е разработен и приложен в два основни етапа:

- Първият етап има за цел да формулира общата методологична и геоинформационна рамка за моделиране на основните геометрични елементи на градското пространство и характера на неговата морфология.

- Вторият етап тества създаденият модел, чрез конкретното му приложение, в определени ключови аспекти, свързани с проблеми на пространственото развитие на изследваното градско пространство.

За моделиране на градското пространство е избран град София и по специално ж.к. Люлин поради няколко основни причини. София като столица представлява един от най-динамично развиващи се градове в страната с разнообразни предизвикателства и възможности в областта на урбанизацията и планирането. Градът е пример за множество урбанизационни процеси, които са типични за съвременните метрополиси, включително интензивно строителство, разширяване на транспортната мрежа и промени в земеползването. Изследването на София предоставя възможност за анализ на сложни урбанизационни модели, които могат да бъдат полезни за други градове с подобни характеристики.

Жилищен комплекс Люлин е избран за фокус на модела поради неговата специфична урбанистична структура и значимостта му в контекста на градското планиране на София. Люлин е един от най-големите жилищни комплекси в столицата, характеризира се със специфично застрояване и разнообразие в типовете жилищни сгради. Това предоставя отлична база за изследване на различни аспекти на градската морфология и ефекта им върху градската среда и качеството на живот.

В процеса на събиране на информация и моделиране представляваща интерес градска територия е създадена иновативна, стабилна и многостранна изследователска методика, която включва напреднали геопространствени технологии, статистически анализи и мултидисциплинарни подходи. Осъвместяването на тези техники улеснява събирането, обработката и анализа на разнообразна пространствена информация, като същевременно допринася за подробното моделиране на структурните сложности на градското пространство.

В рамките на настоящото изследване е събрана голямо количество информация с помощта на различни технологични платформи. Данните са събирани в продължение период от четири години с цел изследването на конкретни системи и проблеми на градското пространство, представляващи интерес на отделни етапи от изследването.

3.1 Пространствено моделиране на урбанизираното пространство чрез въздушна фотограметрия и БЛС

За целите на настоящият дисертационен труд са проведени две целеви фотограметрични заснемания на целият определен пилотен район от урбанизираното пространство на гр. София- жк. Люлин.

За извършването на заснемането е избрана БЛС тип фиксирано крило модел eBeeX на американската компания AgEagle Aerial Systems. Този тип БЛС е единствената (към момента на писане на този труд) сертифицирана платформа от клас A2, която може да извършва полети над хора, както и без постоянен зрителен контакт. За събиране на необходимата информация са използвани фотограметрична камера S.O.D.A и S.O.D.A. 3D. При заснеманията са използвани две еднакви системи, които летят едновременно по предварително зададени различни траектории, така че да не си пречат. По този начин БЛС успяват да покрият площта за два пъти по-кратко време в сравнение с възможностите на една система от този тип.

След приключване на полетите като сурови данни са събрани 2562 геореферирани RGB изображения, които носят визуална информация за актуалното към момента на заснемане състояние на територията.

Данните са обработени чрез софтуер за фотограметрична обработка Pix4D mapper. В този процес са създадени плътен облак от точки (dense point cloud), представящ изследваната територия в 3D и състоящ се от малко над 317 000 000 точки. Създаден е и цифров модел на повърхността (DSM), който представя височината на терена и всички надземни обекти, като сгради и растителност. Използвайки DSM и отделните изображения, е генерирано и ортофото изображение, което представлява геореферирано

въздушно изображение с висока пространствена разделителна способност на изследваната област с коригирани изкривявания, причинени от промените в терена и ъглите на камерата (фиг. 1).

Използваната БЛС разполага с иновативна технология позволяваща използване на корекции в реално време (по време на полет) (RTK), което позволява получаването крайни продукти с хоризонтални и вертикални отклонения под 5см. Готовите резултати са експортирани в познати формати, като облаците от 3D точки са експортирани в .las и .laz, ортофото изображението и DSM в .tiff.



Фиг. 1. (горе) Подобен 3D облак от точки в изследваната територия, получен след фотограметрична обработка в Pix4D среда. (долу) Цифров модел на повърхността (DSM) с висока пространствена разделителна способност (5cm/pix); (Ортофото карта с висока пространствена разделителна способност (5cm/pix) /визуализирани в софтуерна среда – Global Mapper/

3.2 Пространствено моделиране на урбанизираното пространство чрез наземно лазерно (LiDAR) сканиране

С цел събирането на допълнителна подробна информация за спецификата на градските структури в изследването, са използвани и LiDAR лазерни геопространствени технологии. LiDAR (Light Detection and Ranging) технологиите са методи за дистанционно наблюдение, които използват лазерни светлинни импулси за измерване на разстояния и създаване на точни триизмерни изображения на земната повърхност или

сканираните обекти. Тези технологии помагат за получаване на много точни данни за надморската височина, картографиране на терена, растителността, сградите и други обекти, което ги прави незаменими в области като геопространствен анализ, градско планиране, горско стопанство, археология и др.

Използвано е мобилно лазерно сканиране, което може да се извършва от експерт, който да носи сензора в ръка или на гръб (в специално пригодена за тази цел раница), или да бъде прикрепено към превозно средство, например, което да ускори процеса по събиране на данни и обхождане на изследваната територия. Приложеният метод на мобилното наземно лазерно сканиране се базира на технологията SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Това е технология използвана в роботиката и мобилните системи за едновременно изграждане на карта на непозната среда и определяне на позиция на системата в тази среда.

Територията за сканиране е избрана поради комбинацията от елементи на различни типове локални климатични зони, като в границите попадат – ниско и широкоплощно застрояване, запечатани с изкуствени повърхности територии, гъсто застроени жилищни сгради, както и жилищни сгради със затворени големи пространства между тях. За извършване на теренното изследване е използван мобилен лидарен сензор Zeb Horizon на компанията GeoSlam.

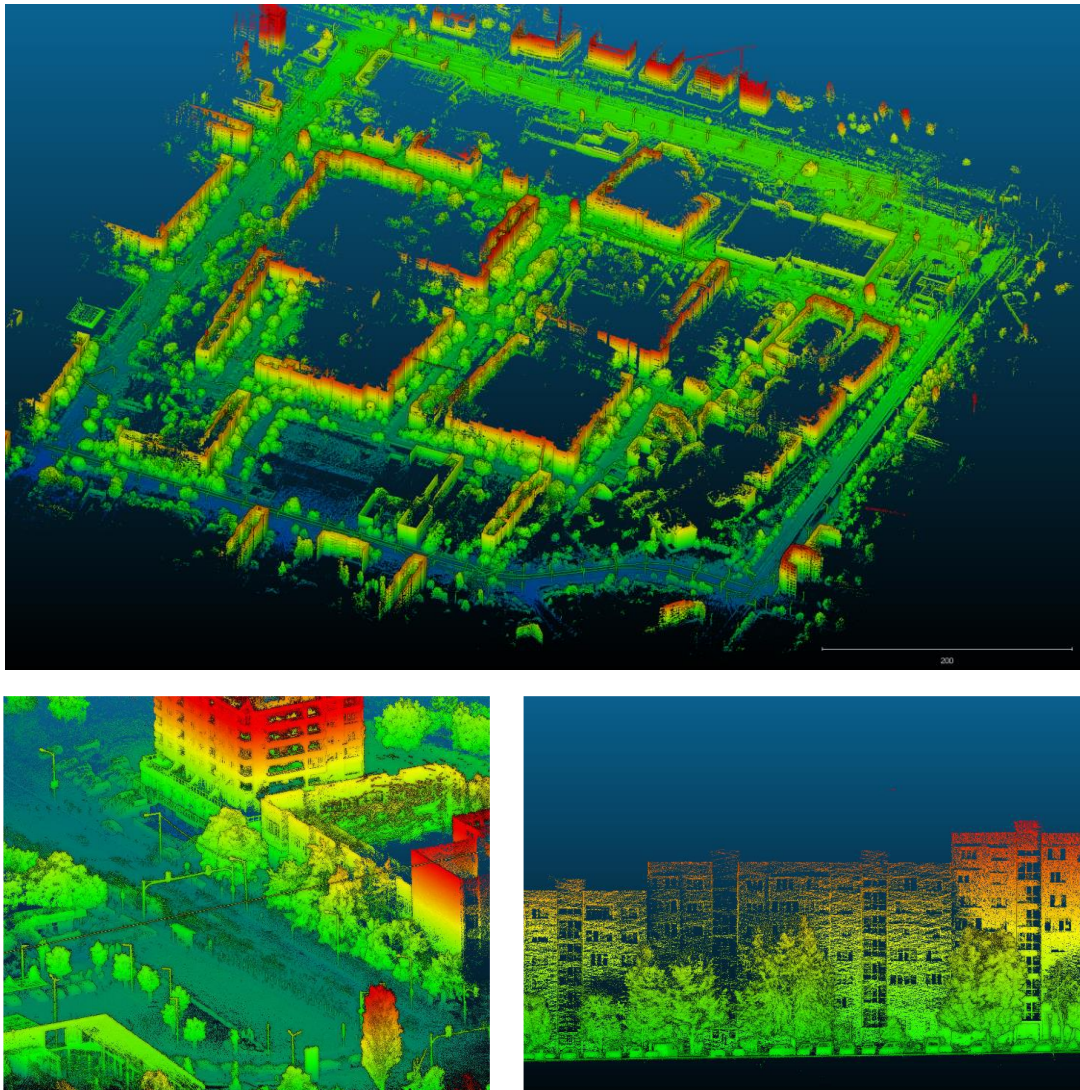
За по-бързото събиране на информация сензора е прикрепен към превозно средство, в случая лек автомобил, с помощта на който да се обиколи представляващата интерес територия (фиг. 2). Предварително е определена траекторията на преминаване, за да не останат места, които да попаднат в сянка.



Фиг. 2. Мобилен лидарен сензор Zeb Horizon прикрепен към покрива на лек автомобил.

След извършване на мобилното сканиране, събраните данни са обработени в специализиран софтуер за лидарни данни. Генериран е плътен и георефериран облак от точки. Този облак от точки представя триизмерната геометрия на околната среда с висока точност и може да бъде експортиран в подходящи за допълнителна работа в софтуерна среда формати за пространствени данни. Полученият облак от точки представлява съвкупност от над 127 000 000 3D точки, пресъздаващи сканираните повърхности в

изследваната територия, към които сензорът е имал видимост с хоризонтална и вертикална точност от под 5cm/px (фиг. 3).



Фиг. 3. Детайлна визуализация /под ъгъл/ на генерирания от сканирането подробен 3D облак от точки. /софтуерна среда - CloudCompare/

3.3 Цифров модел на моделираната територия и характеристика на нейната морфология

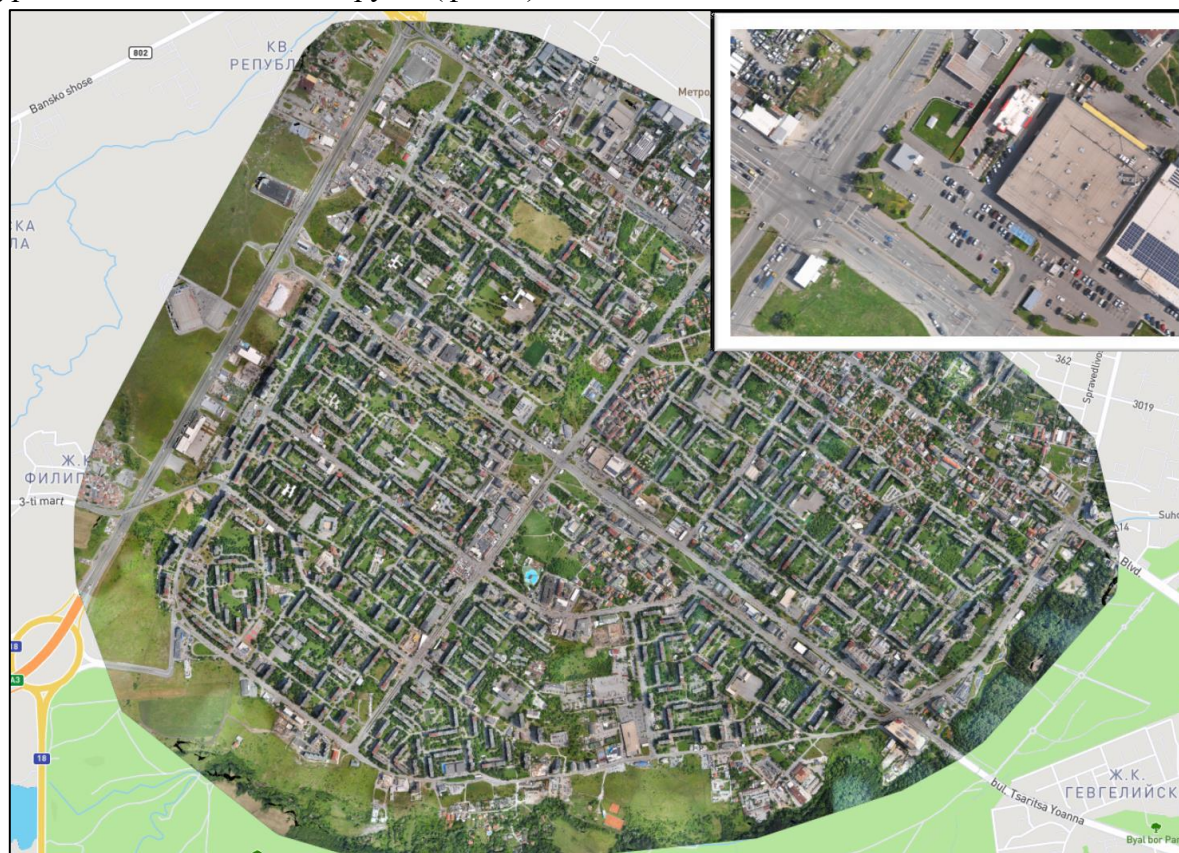
В резултат от интегрираното приложение на геоинформационните технологични решения и инструменти, е генериран цифров геопропространствен модел на градската среда на жк. Люлин, включващ цифрово копие градската морфология. Функционалността за прилагане на RTK (кинаметика в реално време), резултира в много висока точност на геолокирането, като в таблицата по-долу (табл. 1) е представено статистическото описание на тази характеристика в модела.

Вследствие на обработката са създадени 3 основни типа цифрови геопропространствени набори от данни, които стоят в основата на изграденият геопропространственият модел на градската среда:

Минимална грешка [m]	Максимална грешка [m]	Грешка в геолокацията X[%]	Грешка в геолокацията Y[%]	Грешка в геолокацията Z [%]
-	-3.03	0.00	0.00	0.00
-3.03	-2.43	0.00	0.00	0.00
-2.43	-1.82	0.00	0.00	0.23
-1.82	-1.21	0.00	0.00	1.09
-1.21	-0.61	0.00	1.52	2.54
-0.61	0.00	49.59	46.15	46.62
0.00	0.61	49.86	48.81	45.18
0.61	1.21	0.51	3.20	4.22
1.21	1.82	0.04	0.31	0.12
1.82	2.43	0.00	0.00	0.00
2.43	3.03	0.00	0.00	0.00
3.03	-	0.00	0.00	0.00
Средна стойност [m]		0.010276	0.028200	-0.010956
Сигма [m]		0.134869	0.247115	0.325711
Средноквадратична грешка [m]		0.135260	0.248718	0.325896

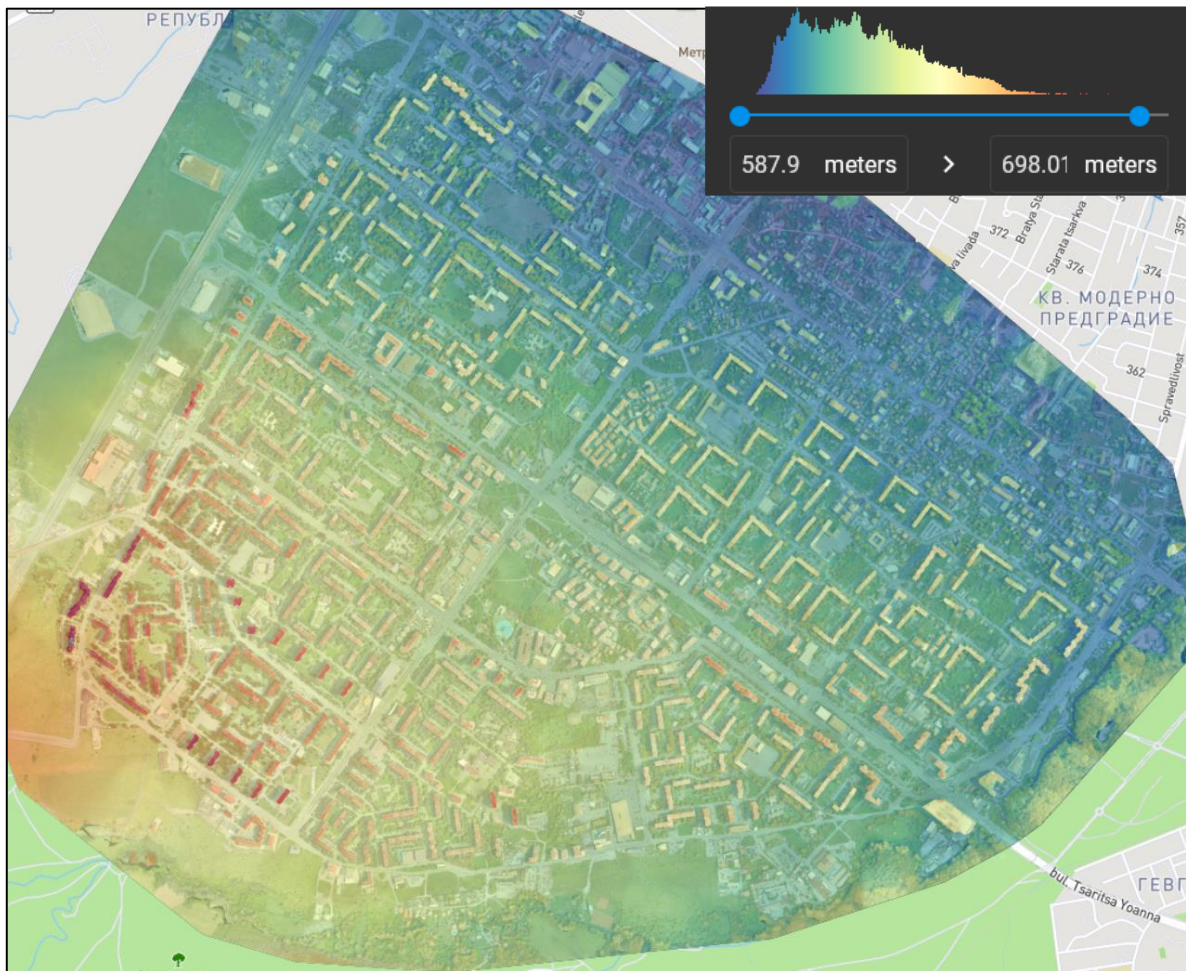
Табл. 1. Статистическа информация за точността на модела.

Ортофото картата: един от основните продукти, получени чрез фотограметрична обработка на данните, е цифрова ортофото карта на моделираната територия. Тя предоставя високопрецизна визуална информация, която е геометрично коригирана и мащабирана, за да отразява точно реалните размери и форми на обектите на земната повърхност. Ортофото картите са с важно приложение в управлението и анализа на градската среда, като осигуряват надеждни данни за инфраструктурни проекти, урбанистични анализи и други. (фиг. 4)



Фиг. 4. Цифрово ортофото изображение на моделираната територия.

Цифров модел на повърхността: от обработката на данните е генериран цялостен цифров модел на повърхността, който отразява максималната височина във всяка точка от изследваната територия, като включва геометричните характеристики на земната повърхност и всички обекти в обхвата на изследваната градска територия. Моделът на повърхността предоставя детайлна и прецизна информация за топографията и надземните структури, като се отличава с висока хоризонтална и вертикална точност, което е от съществено значение за целта на изследването. Подобни цифрови модели стоят в основата на изграждане на дигитални двойници на позволяващи извършването на симулации и визуализации, които подпомагат вземането на информирани решения в разглежданата област. (фиг. 5)



Фиг. 5. Цифров модел на повърхността

3D облак от точки: За целите на настоящото изследване и обективното характеризиране на градската морфология, това е геоинформационният ресурс с най-голямо значение. Същият е генериран в процеса на обработка във формата на оцветен, съгъстен 3D облак от точки. В последствие същият е класифициран, като по този начин е осигурена основната семантична информация за характера на градската морфология в настоящото изследване, като са разграничени четири основни типа повърхности, важни за изследването – запечатани повърхности, сгради, висока растителност и ниска

растителност. Класификацията на моделираното пространство е важна за изследване на морфологичната диференциация, защото позволява точното разграничаване и анализ на различните компоненти на градската среда (фиг. 6).



Фиг. 6. 3D облак от точки за моделираната територия

4. ПРИЛОЖНИ АСПЕКТИ НА ГЕОИНФОРМАЦИОННИЯ МОДЕЛ ЗА ГРАДСКАТА СРЕДА И НЕЙНАТА МОРФОЛОГИЯ

За целите на настоящото изследване, разработеният геоинформационен модел на градската морфология е приложен в два казуса, с оглед демонстрация на възможните приложни аспекти на модела.

Първият е свързан с изследването и картографирането на ефекта на градският топлинен остров на повърхността, при който обективното характеризиране на градската морфология се явява от първостепенно значение за пространствените и количествените характеристики на термалният товар на отделните компоненти на градското пространство и са с определящо значение за интензитета/магнитуда на градският топлинен остров на повърхността (ГТОП). В случая следва да се посочи, че разработеният геоинформационен модел на градската морфология за целите на настоящото изследване, е залегнал в основата на разработената методика за изследване и картографиране на ГТОП от Националният център за геопространствени изследвания и технологии при СУ “Св. Климент Охридски“. Същата е в основата на три публикации, в чиято концепция са използвани редица компоненти от настоящото изследване.

Вторият казус включва използването на информационните ресурси на настоящият геоинформационен модел в изследването на соларният потенциал на покривните

конструкции в рамките на моделната територия. Същият е приложен в конкретен проект, финансиран от германското федерално министерство на икономиката и климата¹.

4.1 Изследване на ефекта на градската морфология върху градският топлинен остров на повърхността (ГТОП)

В концептуално отношение, понятието „градски топлинен остров (ГТО)” (Urban Heat Island, UHI) най-общо може да се дефинира като локален термичен режим на урбанизираните пространства, който се изразява в устойчиво проявление на сравнително по-високи температури на повърхността и на приземния въздушен слой в сравнение с естествените ландшафти и открити пространства, формиращи околната среда на урбанизираните територии.

Когато се говори за градските топлинни острови следва да се има предвид, че това не се отнася до едно строго дефинирано и структурирано явление, а за комплекс от взаимно свързани проявления, които могат да бъдат класифицирани по различни признаци, определяни както на основата на процесите, които ги обуславят и характеризират, така и според използваните методи и инструменти за тяхното наблюдение и изследване.

ГТО най-често се поделят на три основни групи:

- ГТО, дефинирани на базата на температурата на повърхността (ГТО на повърхността).
- ГТО, определяни на базата на термичният режим на подповърхността.
- ГТО, определяни на основата на атмосферните процеси в урбанизираните и субурбанизираните пространства.

В научните изследвания е налице своеобразен консенсус, че генезисът на явлението е пряко свързан с вида на влаганите материали и установената морфология на урбанизираните пространства, формирана при съчетаване на естествените географски характеристики на територията и реализираните градоустройствени модели на развитие (Allegrini, Carmeliet, 2017). Въпреки, че по-голямата част от предишните проучвания са били насочени предимно към климатичните компоненти и характеристиките на земната повърхност, градската морфология всъщност играе решаваща роля за формирането и нарастването на ефекта ГТО (Zheng et. al. 2018).

Настоящото изследване е фокусирано основно към изследването на връзката между градския топлинен остров на повърхността и урбанизираното пространство на София в два мащаба:

- За цялото урбанизирано пространство на София
- За най-големият жилищен комплекс на София – ж.к. Люлин

¹ www.sofia.solarcities.bg

Двете проучвания са реализирани през различни периоди (Съответно за София-2020г, територията на Люлин-2023), като са използвани различни набори от данни, които описват геометричните и семантични елементи на градската морфология и нейната роля в обективното характеризиране на ефекта на ГТО. И двете проучвания, се основават на специфични методологически основи, които са вече утвърдени и публикувани^{39 40}, като и в двете е използвана информационна основа за градската морфология, разработена за целите на настоящият дисертационен труд.

Сред основните морфологични фактори, имащи важна роля за формирането на ГТО, са значително редуцираните естествени повърхности и липсата на плътна растителна покривка, което в силно застроените урбанизирани територии обикновено е за сметка на гъсто разположени сгради или запечатани територии. В слабоурбанизираните пространства растителността обикновено доминира в ландшафтите, което от своя страна позволява по-ефективна регулация на температурния режим на повърхността чрез физически въздействия (например засенчване) или процеси (като напр. евапотранспирация), които редуцират по естествен път топлината в рамките на обособените пространства.

С интензивното урбанистично развитие най-често се свързва все по-голяма загуба на растителност, усилване на процесите на „запечатване“ на повърхността и влошаване на ефективността на естествения дренаж, коригиране на естествената морфология на ландшафтите и разполагането на различни по размер и геометрия изкуствени конструкции. Промяната и модификацията на естествените ландшафти в процеса на урбанизация като цяло лимитира възможностите за поддържането на градските райони в по-прохладно състояние, което в значителна степен се обуславя и от обстоятелството, че застроените зони изпаряват значително по-малко вода, а това допринася за допълнително повишаване температурата на повърхността и на въздуха.

Свойствата на градските материали, които формират морфологията на градските пространства, и по-специално тяхната отражателна способност, топлинната излъчваемост и топлинният капацитет оказват съществен ефект върху формирането и проявлението на ГТО. Те са определящи за формирането на конкретни термични режими в различните части на урбанизираните пространства в зависимост от способността им да излъчват и абсорбират топлинна енергия.

Допълнителен фактор, влияещ върху развитието на градския топлинен остров, особено през нощта, е градската геометрия, която се отнася до размерите, конфигурациите и разстоянията между сградите в урбанизираните пространства. Градската геометрия влияе върху въздушните потоци, поглъщането на енергия и способността на дадена повърхност да излъчва дълговълнова радиация. Влиянието на градската геометрия върху градските топлинни острови често се описва чрез показателя „sky view factor” (SVF), или „коефициент на видимостта на небето“, който е видимата област на небето от дадена точка на повърхността.

С особена важност при изследване на ГТО е неговият интензитет (магнитуд) и темпорална изменчивост. Интензитетът на ГТО може да се определи като разлика между

температурите на елементите в урбанизираното пространство и заобикалящите ги отворени, слабоурбанизиранни пространства (Rizwan et. al. 2008).

В настоящият казус, създаденият информационен модел е използван в няколко логически свързани направления- в разработването на цялостна схема за 1) Локално климатично зонироване на урбанизираното пространство на София, 2) В изследване и обзорно картографиране на ефекта на ГТОП в София 3) В детайлно картографиране и оценка на ГТОП в жк. Люлин.

4.1.1 Локално климатично зонироване (Local Climate Zoning) на база земно покритие и особености на градската морфология

Основен проблем при изследванията на градския климат е липсата на световно призната класификация на урбанизираните територии по отношение на климатичните условия в тях, които адекватно да отразяват връзката между тези условия и формираната градска морфология. Всеки град е изложен на различни локални климатични фактори, отличава се със специфичен характер на морфологията на средата, което прави изследването на градския топлинен остров сложно и специфично за всяко населено място.

Разработена и приложена е нова климатична класификация за урбанизираните територии, представени чрез „локални климатични зони” (ЛКЗ) за урбанизираното пространство на столицата. Същата се базира на предложената схема, разработена Оке и Stewart (2012), която успешно се прилага в различни като генезис и структура градски територии през последните години и постепенно се утвърди като водеща класификационна схема за такъв род изследвания.

Всяка ЛКЗ има характерен температурен режим, който се проявява най-вече над сухи повърхности, в спокойни и тихи нощи и при терени с относително неразчленен релеф. Съществуват десет типа застроени площи (от LCZ 1 до LCZ 10) и седем типа (класа) земна повърхност (от LCZ A до LCZ G) (табл. 2), като в допълнение тези типове могат да имат сезонни или други по-кратки вариации на свойствата на земното покритие.

Типове ЛКЗ според застрояването	Типове ЛКЗ според земното покритие
ЛКЗ 1 – Компактно високо застрояване	ЛКЗ А – Гъста дървесна растителност
ЛКЗ 2 – Компактно средновисоко застрояване	ЛКЗ В – Рядка дървесна растителност
ЛКЗ 3 – Компактно ниско застрояване	ЛКЗ С – Храстовидна растителност
ЛКЗ 4 – Високо застрояване с отворени пространства	ЛКЗ D – Ниска растителност
ЛКЗ 5 – Средновисоко застрояване с отворени пространства	ЛКЗ Е – Запечатени повърхности
ЛКЗ 6 – Ниско застрояване с отворени пространства	ЛКЗ F – Гола почва / пясък
ЛКЗ 7 – Нестабилно ниско застрояване	ЛКЗ G – Водни площи
ЛКЗ 8 – Широкоплощно ниско застрояване	
ЛКЗ 9 – Застрояване с ниска гъстота	
ЛКЗ 10 – Промислени зони	

Табл. 2 Типове ЛКЗ според застрояването и типове ЛКЗ според земното покритие

Главните етапи на работа включат най-общо три изследователски процедури:

- 1) Определяне на характера на зоната на база геометричните характеристики на повърхността и обектите, които са включени. Това се извършва на база цифровият модел на градската морфология и класификацията на обектите, извършени на основата на извличане на информационни ресурси от семантичната и геометрична класификация на съгъстеният 3Д облак от точки,
- 2) Визуално представяне на характера на зоната
- 3) Статистическа характеристика на основните морфологични и други показатели, получени чрез обработка на данните от проведените теренните измервания.

Подхода, който е използван се различава от оригиналният, разработен от Оке като е трансформиран и адаптиран за целите на изследването, с оглед наличието на съответните технологични инструменти, които позволяват по ефективно измерване на температурата на повърхността, чрез безпилотна летателна система с интегриран на борда термален сензор.

За целите на настоящото изследване са използвани два набора от данни за температурата на земната повърхност, генерирани чрез дистанционни методи - сателитни данни и данни от БЛС.

Температура на земната повърхност (ТЗП) се дефинира като температура на най-горния слой на повърхността (покриви, пътища, дървета, трева, вода и др.) (Qin, Z., 1999). Температурата на земната повърхност е широко използван показател при анализиране на градския топлинен остров на повърхността (Surface Urban Heat Island, SUHI), което се отнася до топлината на повърхностния земен слой, тъй като променливата, която се анализира е температурата на повърхността, а не температурата на въздуха над нея (Voogt & Oke, 2003).

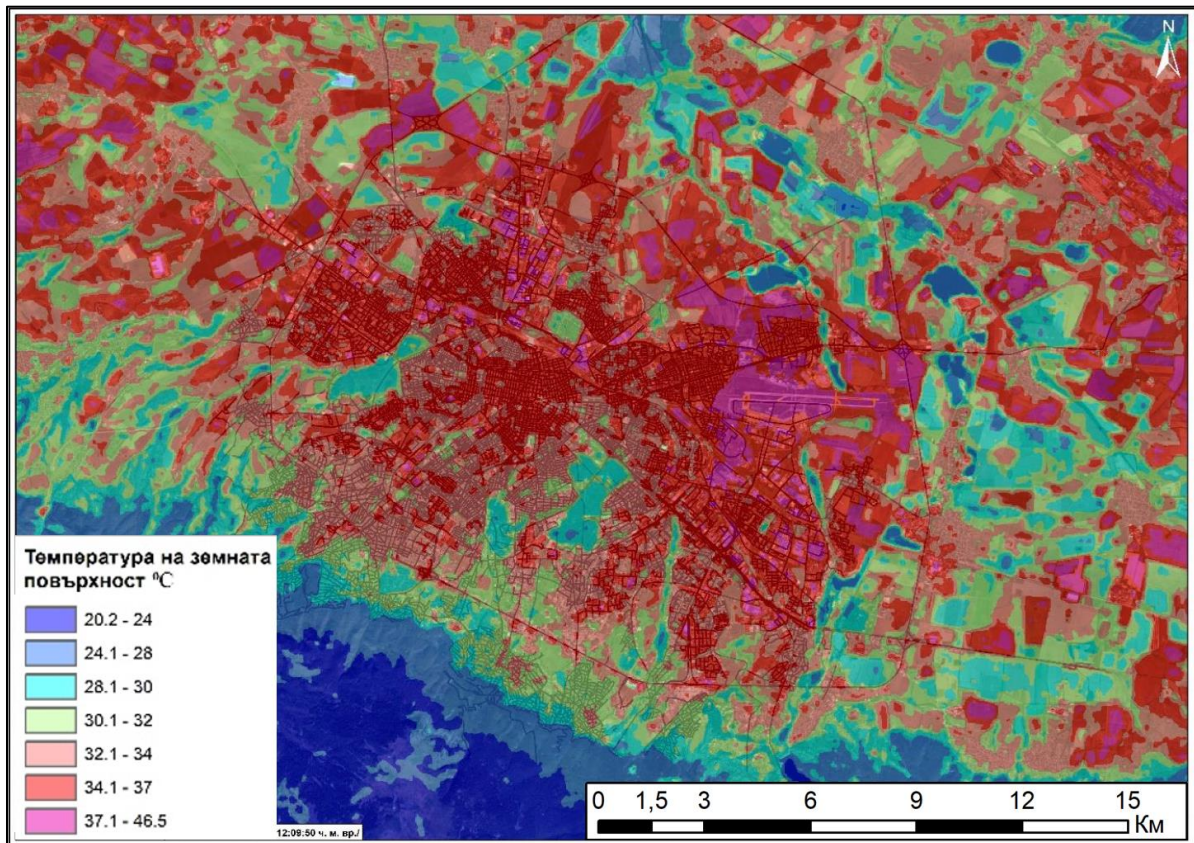
Информацията за температурата на повърхността може да бъде получена чрез дистанционни методи, тъй като вътрешната топлина на обекта на изследване се преобразува в излъчване и има силно позитивна взаимовръзка между вътрешната температура и излъчвания от обектите топлинен поток.

Данните за ТЗП от дистанционни изследвания (ДИ) предоставят продължителност и непрекъснатост на наблюденията над целия град, поради което представляват уникален източник на информация за детайлно изследване на градски топлинни острови на повърхността и за градския микроклимат. Ако се вземе предвид и предимството на архивите от времевите серии от наблюденията на спътниковите сензори, то сателитните данни имат огромен потенциал за изследване на пространствения модел и динамиката на топлинната среда (Weng, 2009).

За изчисляване на ТЗП от сателитни данни е избран метод базиращ се на данни от топлинните канали на Landsat 8. При направена справка на броя и качеството на заснеманията от Landsat 8 във времеви интервал на месец август 2019 г. е избрано заснемане от 12.08.19, защото в рамките на същия ден екипът е на терен и в някои части

от изследваната територия е извършено изследване на температурата на земната повърхност, с помощта на БЛС.

Трябва да се отбележи, че температурата на повърхността от спътникови данни не се измерва директно, а се изчислява на базата на определени математически зависимости. За изчисление в конкретния случай е приложен алгоритъм за пресмятане на ТЗП (Avdan, U., 2016), използвайки изображения от Landsat 8. (фиг. 7)



Фиг. 7. Температура на земната повърхност (°C), изчислена на база сателитни изображения от Landsat 8, към дата 12.08.2019 /12:09:50 часа м.вр./

С оглед необходимостта от анализиране на връзката между ефекта на ГТОП и градската морфология, в настоящото изследване основно са използвани данни за температурата на повърхността, генерирани от БЛС. Използвани са два основни технологични инструмента, които изискват различен подход и съответно методика:

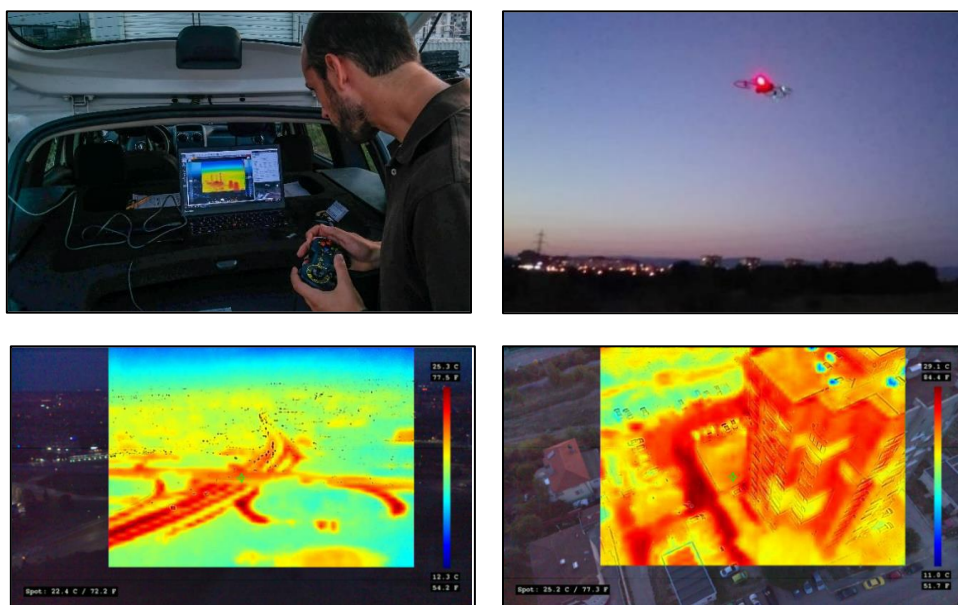
1) За картографирането на ефекта на ГТОП за територията на гр. София е използван инструмент с фокусирано (точково) измерване на температурата на повърхността, с динамична скала. Самото измерване е приложено извадково, в рамките на предварително определена стратифицирана извадка, генерирана на база статистическите характеристики на отделните ЛКЗ.

2) За картографиране на ефекта на ГТОП за територията на Люлин, е използван подход на площно термално картографиране, чрез интеграция на термална с фотограметрична камера. Това дава по-голяма представителност на резултатите, но е

доста по трудоемко и изисква значителни ресурси за неговото осъществяване (технологични, човешки и времеви).

Самото измерване на температурата на земната повърхност за територията на София на база стратифицираната извадка е осъществено чрез използването на Безпилотна летателна система Albris на швейцарската фирма Sensefly. Системата представлява инспектиращ квадрокоптер, притежаващ 5 сензора и 3 видеокамери. Системата е снабдена с термална камера с параметри 80x60 пиксела с 50 градусов ъгъл и фиксирана измервателна точка, позиционирана на 3-осна глава (гимбъл). Безпилотната летателна система дава възможност за дистанционно заснемане на термални изображения и видео с динамично адаптируема скала в реално време (фиг. 8).

Като най-подходящ период на изследване температурата на земната повърхност са определени месеците юли и август. Поради климатичните си характеристики периодът се определя като такъв с най-висока средна температура през годината, което е основна предпоставка за силно изразени признаци на явлениято ГТО. Ефектът му е най-силно изразен във вечерните часове, непосредствено след активното слънчево греене. Поради условията, при които най-ясно се откроява явлението, за измерване температурата на земната повърхност с помощта на БЛС е избран часовият интервал между 20:00ч. и 22:00ч. Така, през август 2019 г. е извършено поетапно термално заснемане на всички предварително определени за тази цел площи с помощта на БЛС. Резултатите от тези заснемания са термални изображения на повърхностите, към които е насочен сензора в момента на заснемане. Всяко едно от изображенията носи информация за температурата, която отдава заснетата повърхност (фиг. 8).



Фиг. 8. (горе) Измерване на ТЗП на терен с помощта на БЛС (долу) Термални растерни изображения получени при измерване на ТЗП с помощта на БЛС

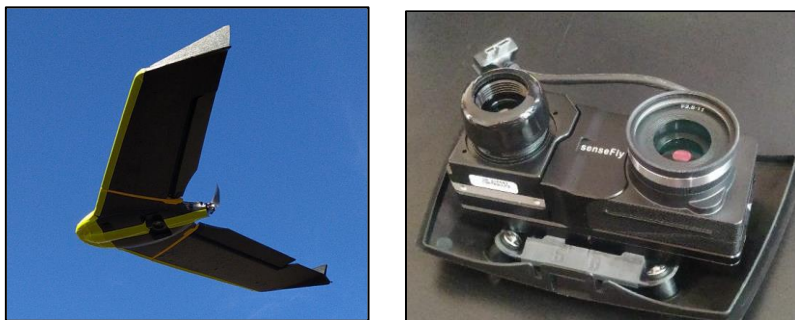
Всяка една от изследваните представителни площи представлява съвкупност от различни типове земно покритие и застрояване. За да бъде изчислена правилно температурата на повърхността в рамките на всяка една термално изследвана площ са извършени заснемания на температура на различни типове повърхност, групирани в

четири категории: 1. Запечатани повърхности; 2. Сгради; 3. Растителност; 4. Водни обекти. Всички тези стойности са използвани при изчисляването на средната за всяка една площ температура на земната повърхност. За да бъде правилно изчислена средната температура за всяка клетка е формула за аритметично претегляне на една променлива на базата на друга променлива.

Второто изследване на термалните характеристики е извършено през лятото на 2023г, за територията на жк. Люлин. То се основава на обстоятелството, че през последните години бе постигнат успех в създаването и развиването на сензори, пригодени за БЛС, които да измерват и картографират ТЗП в много по-голям детайл и висока пространствена разделителна способност.

За провеждане на теренното изследване е избран периодът във втората половина на месец юли и най-топлите дни от него. Поради климатичните си характеристики този период се определя като такъв с най-висока средна температура през 2023 годината, което е основна предпоставка за силно изразени признаци на явлението ГТО. Същият месец е определен и като този с най-високи и рекордни измерени температури за цялата история на официални измервания в глобален мащаб². Поради условията, при които най-ясно се откроява явлението, за измерване температурата на земната повърхност с помощта на БЛС е избран отново часовият интервал между 20:30ч. и 22:00ч. Така, през юли 2023 г. в рамките на 4 дни (11-14.07.23) е извършено поетапно термално заснемане на всички квартали в ж.к. Люлин с помощта на БЛС.

За извършването на заснемането е избрана БЛС тип фиксирано крило модел eBeeX на американската компания AgEagle Aerial Systems. За събиране на необходимата информация платформата е снабдена със специализиран термален сензор Duet T, обединяващ термална Flir камера с фотограметрична S.O.D.A. камера от Sensfly (фиг 9).



(фиг. 9) (ляво)БЛС тип фиксирано крило модел eBeeX на американската компания AgEagle Aerial Systems); (дясно) Duet T сензор с термална и фотограметрична камера.

Предвид кратките интервали от време подходящи за събиране на необходимата информация и възможностите на избраната БЛС полетите са предварително проектирани в специализиран за тази цел софтуер, така че да покриват необходимата територия за предварително определения интервал от време. За целта са проектирани четири полетни

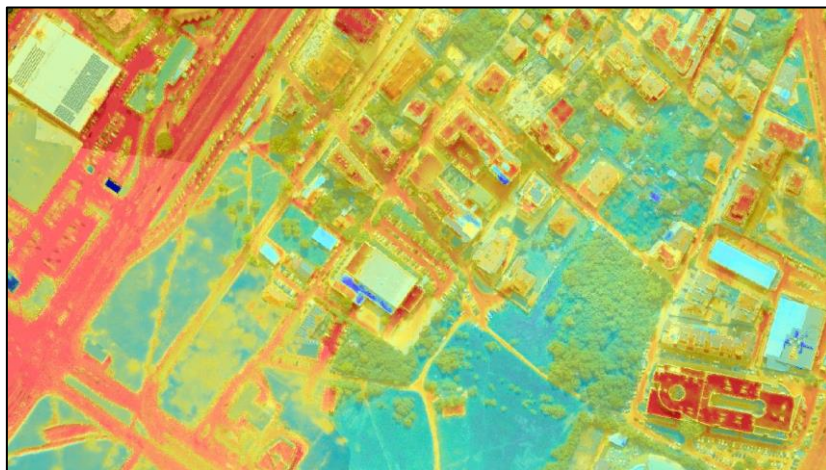
² Copernicus MONTHLY CLIMATE BULLETIN; July 2023, <https://climate.copernicus.eu/july-2023-warmest-month-earths-recent-history>

блока за всеки един от дните, като всеки блок включва територия, която да бъде облетяна в рамките на 90 мин (приблизително два полета с предпочетената летателна платформа). Предвид сложността и силната разчлененост на изследваната урбанизирана територия са избрани три различни локации, от които да бъдат извършени излитанията и кацанията с БЛС (фиг. 10).



Фиг. 10. Теренна работа – заснемане на ТЗП с помощта на БЛС в границите на Люлин (13.07.2023 21:10ч)

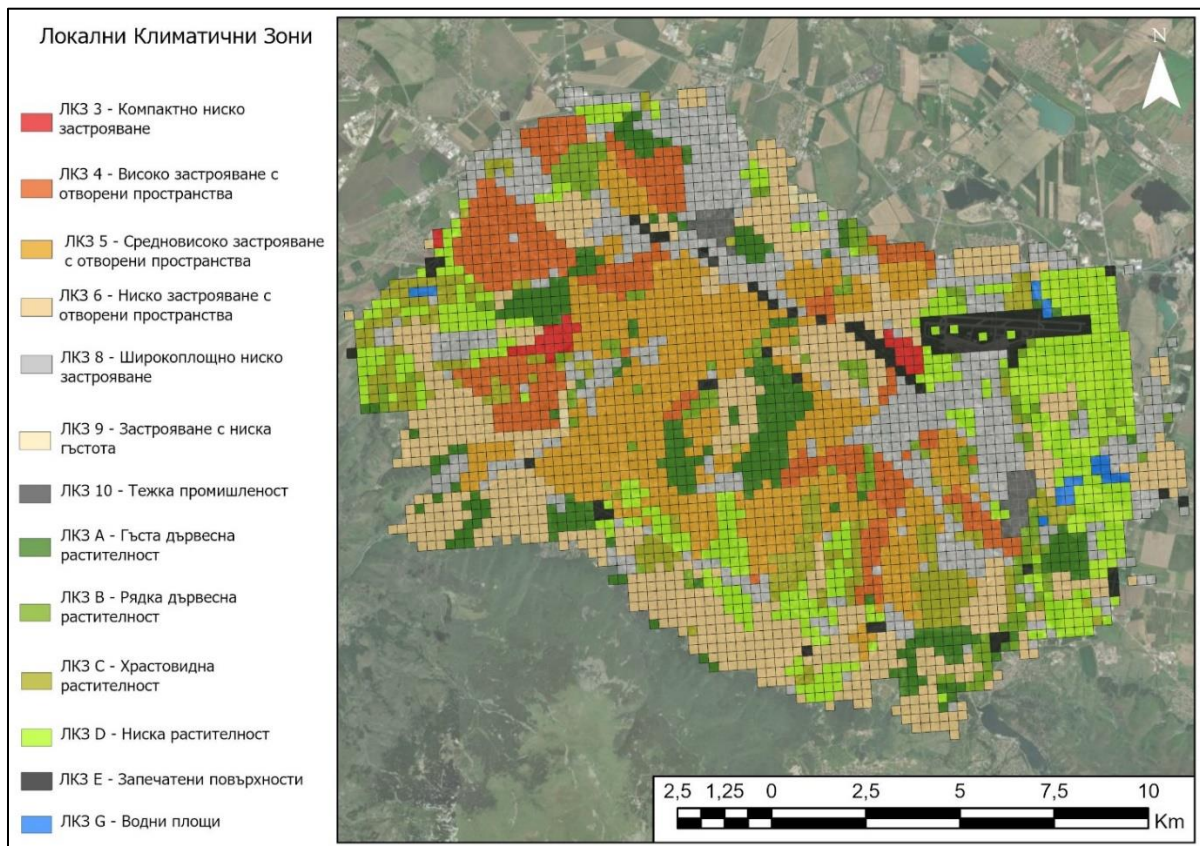
Благодарение на използвана технология и метод на събиране на информация за ТЗП в рамките на четирите дни са събрани общо около 8561 снимки с информация за температура на земната повърхност. Всяко едно от тези изображения е геореферирано растерно изображение, носещо температурна стойност за всеки един пиксел, който го изгражда. В процеса на обработка е приложен метод на термална фотограмметрия в специализиран софтуер Pix4D, като са използвани пригодени и интегрирани за подобни изследвания алгоритми на работа за термални снимкови данни. Първоначално термалните данните са обработени в четири отделни проекта, създадени в софтуерна среда, поради различните времеви периоди, в които са извършени заснеманията. За всеки от четирите дни е подготвен проект с параметри на заложената информация и очакваните крайни продукти от процеса. Пресметнат е термален индекс на заснетата територия, представляващ термална растерна карта с подобрена на база допълващите проекта RGB изображения висока пространствена разделителна способност (фиг. 11). Подобен продукт предоставя възможности, които далеч надхвърлят разгледаните данни от изследването през 2019 година.



Фиг. 11. Температурно изображение комбинирано с RGB изображения за по-ясна визуализация на ТЗП.

Освен термалните характеристики на ЛКЗ, много важно значение има и характеризирането на тяхната морфология и климатична специфика, което се осъществява чрез набор от т.нар. метаданни на ЛКЗ. Те се отнасят към извличането на ключови характеристики за морфологията и състоянието на градския контекст около конкретен проучван обект (Emmanuel MPR, et. al. 2013). За целите на настоящото изследване като основа е използван генерираният геоинформационен модел на градската морфология, за да се определи местоположението на площите в рамките на конкретната ЛКЗ и обективно да се характеризира нейната структура. В допълнение са използвани и други източници на данни- данни от кадастъра, данни за земеползването и земното покритие, както и данни от Google Earth. Тези информационни ресурси следва да представят възможно най-обективно връзката между морфологията на градската среда и формираните микроклиматични условия.

Поради сложната и пространствено неравномерно разпределена градска морфология в град София, е взето решение територията на изследване да се раздели на еднакви по големина и форма териториални единици - клетки със страни 250м x 250м. Техният общ брой в границите на изследваната територия възлиза на 3299, като по този начин се постига уеднаквяване на обхвата на отделните единици, обект на изследване. Това от своя страна прави приложението на геостатистическите и пространствено-интерполационни методи по-надеждно и обосновано. С получените резултати от този анализ е извършено картографиране на локалните климатични зони според приложената класификация (фиг. 12).



Фиг. 12. Локални климатични зони в София

4.1.2 ГТО на повърхността в границите на урбанизираното пространство на град София

Приложение на данни от сателитни платформи

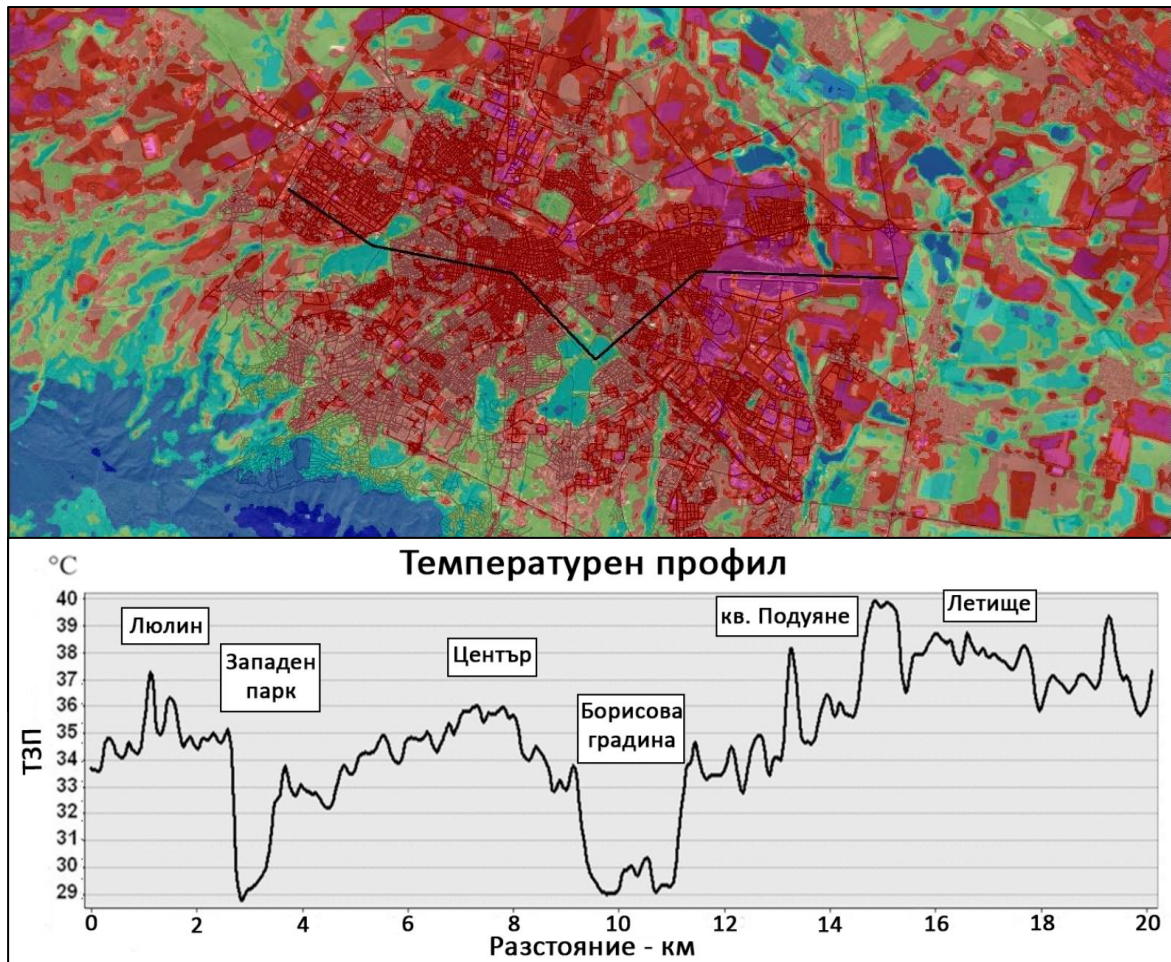
В резултат от приложеният подход описан в предишната глава, са генерирани цифрови геопространствени слоеве с данни, които характеризират както температурата на земната повърхност към момента на заснемане, така и характера на земното покритие по отношение на разпределението на растителността и запечатаните територии в рамките на гр. София и близките околности. Основен проблем и недостатък на приложения подход е свързан с ограниченията, които обективно съществуват по отношение на времевият период, в който се осъществяват заснеманията на територията. В случая използваните изображения от платформата Landsat 8 се заснемат за територията на София по обяд местно време, когато земната повърхност е най-силно нагрята и липсва информация за температурата на въздуха след залеза на слънцето. Това налага необходимост от подобряване на методите за извличане на температура на земната повърхността от топлинни сателитни изображения, както и опити за интегриране на друг тип платформи за дистанционни изследвания, каквито са безпилотните летателни системи.

Независимо от този обективен недостатък на изходните сателитни данни, резултатите от проведеното изследване на базата на данни от платформата Landsat 8, ясно показват, че урбанизираните територии се отличават със значително по-високи температури на повърхността в сравнение с териториите, в които преобладават естествени ландшафти. Ясно може да се установи, че най-ниските температури на повърхността се отнасят до водните тела и площите с естествена растителност, вкл. зелени пространства, горски паркове и градски градини, докато най-високите температури се отнасят до голи почви и скали и непроницаеми повърхности с различни типове индустриално, жилищно и транспортно земеползване. Особено силно нагreti са териториите, разположени в източната част на града, непосредствено в района на летището и около него. Високи температури на земната повърхност се отчитат също в централната част, където застрояването е гъсто, в комбинация с тесни улици и ограничени междуградски пространства, както и в комплексите, където са налице ограничена като площ и структури паркови и озеленени пространства. Високи температури се наблюдават и по протежение на големите пътни артерии, както и в рамките на основните пътни възли и кръстовища, което се дължи на ниската отражателна способност на асфалтовото покритие и неговият значителен топлинен капацитет.

Същевременно при парковите зони в рамките на града и естествените ландшафти в околградските пространства се наблюдава значително по-ниска температура на повърхността, от порядъка на 10-17 °C разлика с най-високите изчислени температурни стойности. Освен това ясно се наблюдава, че същите имат значителен охлаждащ ефект и върху съседните урбанизирани пространства.

За да се потвърдят описаните дотук резултати, е построен температурен профил от запад на изток (фиг. 14), който проследява измененията в температурата на земната

повърхност на различни типове земно покритие в рамките на града. Стойностите от температурния профил ясно показват значително по-високите температурни стойности за територии със запечатани пространства и такива с гъсто разположени високи сгради. Отчетливо се забелязва и охлаждащият ефект на парковите зони и естествените ландшафти върху съседните урбанизирани пространства. Профилът подчертава също максималните стойности на ТЗП, които се забелязват в района на летището (фиг. 13).

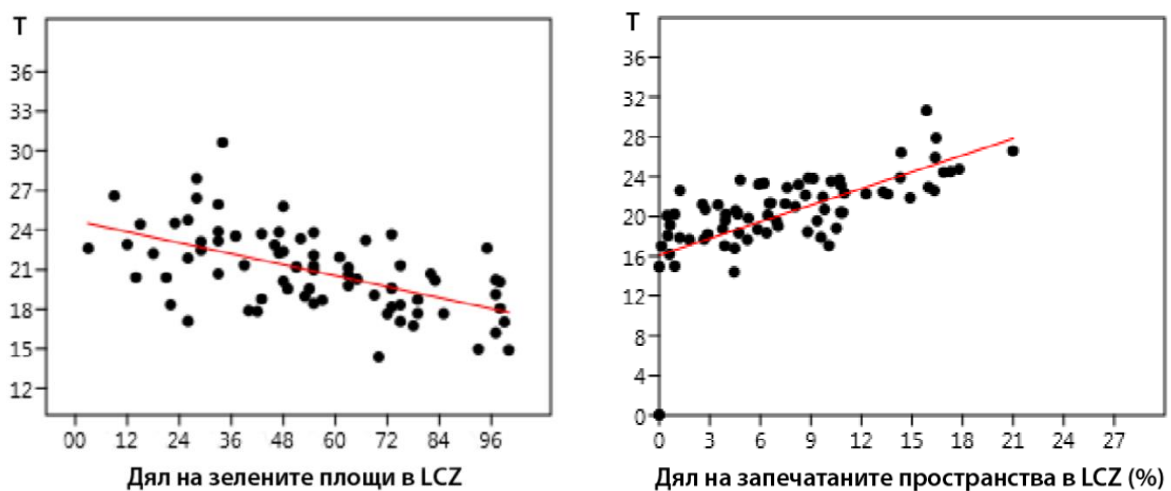


Фиг. 13. Профил на температура на земната повърхност

Приложение на данни за ТЗП от безпилотни летателни системи на извадков принцип, за територията на София

На база на методиката за събиране на данни за ТЗП чрез стратифицирана извадка от БЛС приложена през лятото на 2019 година и локално климатично зонироване, описано по-горе – за всяка ЛКЗ са обработени и изведени статистическите данни за измерените в нея ТЗП, като изключения са ЛКЗ 3 и ЛКЗ G, които са представени само от по една изследвана клетка и съдържат само по една стойност за температура. От всички 74 изследвани клетки, пет типа покриват 77,3 % от общата площ от всички изследвани клетки. Това са ЛКЗ 4 (7 клетки), ЛКЗ 5 (15 клетки), ЛКЗ 6 (12 клетки), ЛКЗ 8 (14 клетки) и ЛКЗ D (10 клетки).

Най-високите средни и медианни стойности на ТЗП (25,1С) са регистрирани в ЛКЗ 9, но поради незначителния относителен дял на зоната (~1,0 %) нейният принос към общия брой на топлинното натоварване на града е незначителен. От друга страна, най-високите максимални стойности на ТЗП (27,9-30,6 С) са наблюдавани в ЛКЗ 4 и ЛКЗ 5, които заемат значителен дял (около 30 %) от градската територия. Както се очакваше, най-ниските температури са измерени в "естествените" на климатичните зони (ЛКЗ А - ЛКЗ G). На основата на геостатистическото изследване са изведени конкретни регресионни зависимости (фиг. 14), които от своя страна позволяват постигането на по-надеждни резултати от интерполацията на данните в ГИС среда и по-висока точност при определяне на пространствения обхват и конкретните проявления на ГТО в рамките на урбанизираното пространство. Получените резултати са използвани за построяване на линейни регресионни зависимости по метода на най-малките квадрати между площите на главните типове земеползване (като независима величина) и средните измерени температури по типове земеползване (като зависима величина). Генералните изводи потвърждават хипотезата, че колкото по-голям е дялът на зелените площи, толкова по-ниски са измерените температурни стойности, и обратно – колкото по-голям е дялът на застроените и запечатаните пространства, толкова по-високи са измерените температури.



Фиг. 14.. Линейни регресионни зависимости (ляво) между зелените площи и средните измерени ТЗП по типове земеползване (дясно) между запечатаните пространства и средните измерени ТЗП по типове земеползване.

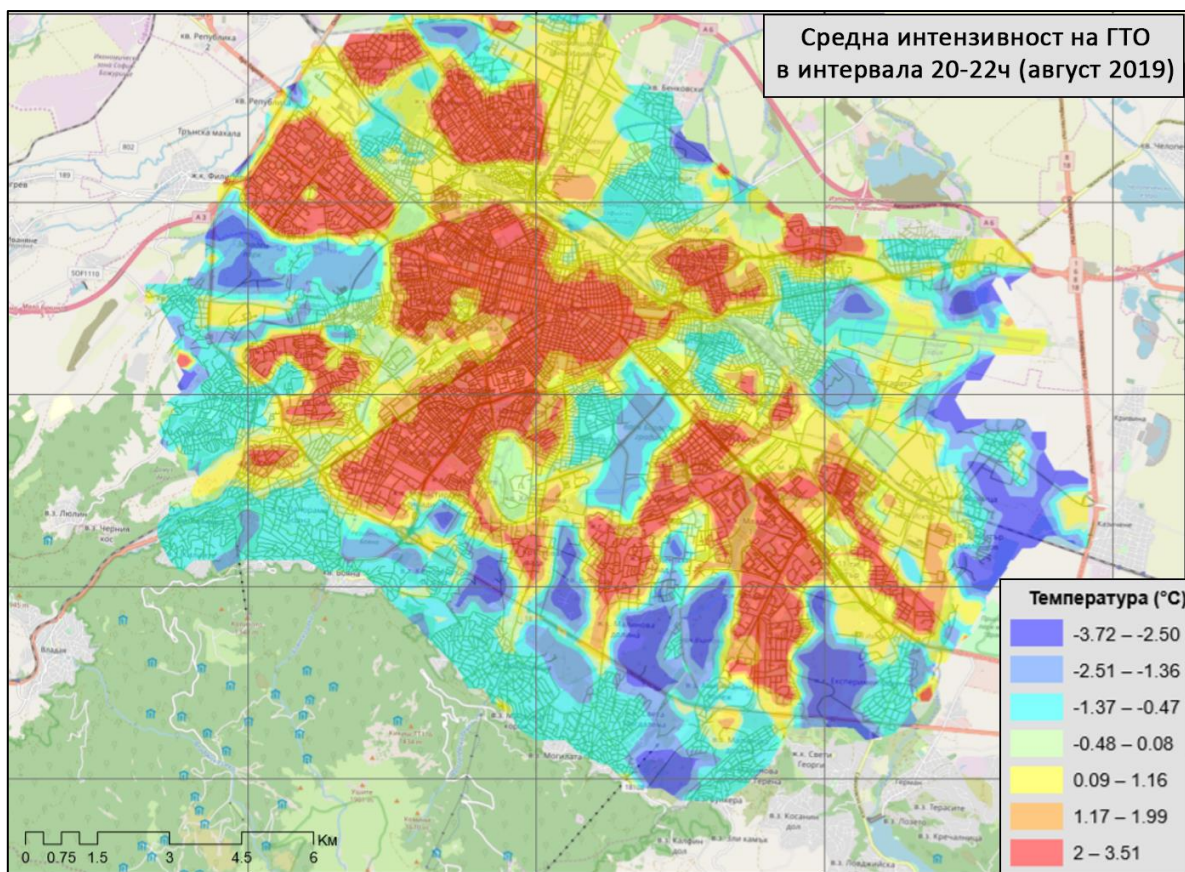
На база на така изведените регресионни зависимости и на основата на пространственото разпределение на измерените локации от стратифицираната извадка, е конструиран геостатистически интерполационен модел, на чиято основа е генериран слой с пространственото разпределение на температурите на повърхността в часовия интервал 20-22 часа за м. август 2019 г.

Резултатът от пространствената интерполация ясно показва, че в рамките на урбанизираното пространство в София е формиран полиструктурен (полицентричен) градски топлинен остров.

Тези температурни разлики в най-голяма степен характеризират сложността на ГТО и представят една от най-важните му характеристики – интензитета (магнитуда) на явлениято. Интензитетът на ГТО за всяка ЛКЗ обективно характеризира силата на проява на ГТО в пространствен аспект. Интензитетът се изчислява по следния начин:

$$\Delta T_{ЛКЗ} = X - Y$$

където ΔT е максималната разлика от израза ЛКЗ $X - Y$, в който X = температурата на дадената ЛКЗ, а Y = температурата на останалите ЛКЗ за сравнение. На база на получените данни в тази матрица е създадена статистическа повърхнина представяща интензитета на ГТОП в урбанизираното пространство на град София (фиг. 15).



Фиг. 15. Карта на средния интензитет на ГТО в София през август 2019 г. (20:00-22:00 ч.)

В рамките на изследването е извършено и z-трансформиране на стойностите на температурата, като е направен опит да бъде картографирано топлинно натоварване в София. Данните за ТЗП са използвани за предварителна оценка на топлинното натоварване (Решк, R., et. al. 2012) в София, което можем да категоризираме в четири етапа (най-благоприятен, благоприятен, по-малко благоприятен и най-неблагоприятен) въз

основа на стандартизираните стойности на температурата от приложените z-трансформации в съответствие със следната формула.

$$z = (x - \mu) / \sigma$$

където X е средната температура на всяка отделна клетка, μ е средната температура на всички клетки и σ е стандартното отклонение на средната ТЗП на всички клетки.

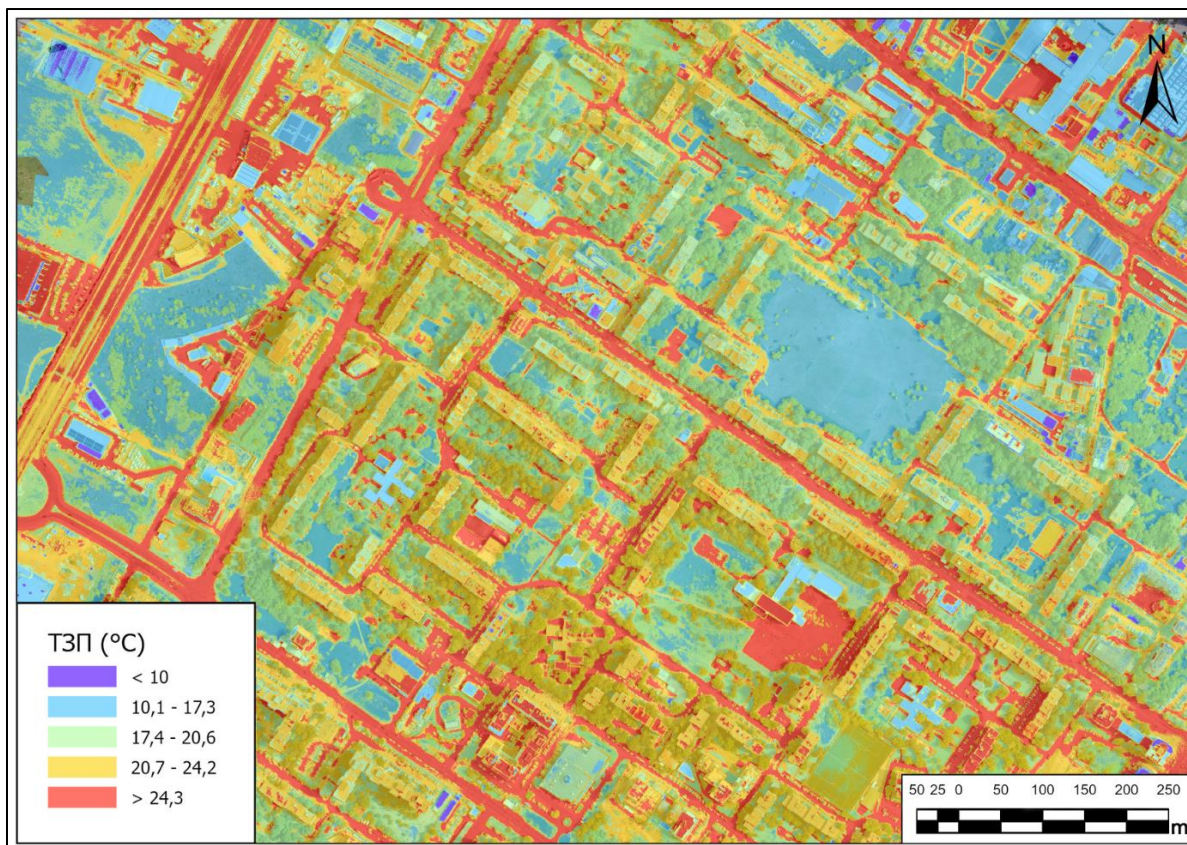
Областите със стойности на $z < -1$ се отличават с най-ниски нива на топлинно натоварване. Те обхващат 16,22% от урбанизираната територия и включват предимно горски райони, райони с тревиста или храстова растителност и водни обекти (ЛКЗ А, ЛКЗ С, ЛКЗ D, ЛКЗ G), както и райони с ниско строителство с дворове и градини, с дървета, разпръснати между сградите (ЛКЗ 6).

Най-ниската стойност на z-score в тази категория е регистрирана в ЛКЗ D (z-score = -2.10). Категория 4 покрива 12,16% от урбанизираната територия и показва най-висока степен на топлинно натоварване със стойност за z над 1 (т.е. райони с ТЗП по-висока от средната стойност с едно стандартно отклонение). Това са предимно райони с високо и средно високо строителство (ЛКЗ 4 и ЛКЗ 5), както и големи нискоетажни сгради с обширни запечатани пространства между тях (ЛКЗ 8). Дори единични клетки с z-score = 3.11 (ЛКЗ 4) и z-score = 2.24 (ЛКЗ 5) попадат в тази категория. Другите две категории (2-ра и 3-та) обхващат най-голям дял от урбанизираното пространство (71,62%).

4.1.3 Детайлно изследване на ГТО на повърхността в границите на ж.к. Люлин (град София)

Получените и обработени данни от термалното заснемане извършено през 2023г. са под формата на растерни слоеве с висока пространствена разделителна способност, която дава възможност за изследване на градския климат на микро ниво и определяне на нагрятоост на отделни обекти с големина от няколко сантиметра и тяхното температурно влияние в територията, водещи до резултати, които не са постижими с друг тип данни, на този етап.

Изработените температурни растерни изображения и за четирите дни ясно показват, че урбанизираните територии се отличават със значително по-високи температурни стойности на повърхността в сравнение с териториите, в които преобладават естествени ландшафти (фиг. 16). На същата карта съвсем ясно се установява, че най-високите температури на повърхността се отнасят до запечатани повърхности, като площадки, паркинги, булеварди и улици в изследваната територия, докато повърхностите включващи естествени елементи като средна и висока растителност, както и ниска тревна растителност са със значително по-ниска температура на повърхността.



Фиг. 16. Карта на ТЗП в границите на ж.к. Люлин, визуализираща данни заснети на 11.07.23г. между 20:30 и 22:00 часа.

За разлика от използвания през 2019 година метод на дигитализация на различните типове повърхност в границите само на изследваните термално клетки, при изследването през 2023 година е на разположение пълна термална картина за цялата територия на изследване. Високото ниво на детайлност в така събраните данни за територията позволява значително по-вярно и лесно да бъдат дигитализирани различните типове повърхност.

За извършване на висококачествена дигитализация на различните типове повърхност в рамките на изследваната територия с цел по-пълно и подробно разбиране на проявление на ефекта на градски топлинен остров е използван метод за класифициране на повърхностите на база 3D облак от точки. С висока степен на достоверност са класифицирани различните типове повърхности в изследваната територия. За да бъде извършен статистически анализ, класифицираният облак от точки е обработен в ГИС среда, като типовете постилаща повърхност са дефинирани в четири категории – тревиста растителност, висока растителност, сгради и запечатана повърхност. (фиг. 17)

За изчисляване на средната температура в различните типове повърхност е приложена зонална статистика, която да обобщи термалните растерни стойности в рамките на всеки тип повърхност (Табл. 4 и Фиг. 18).



Фиг. 17. Векторизиран полигонен слой с информация за типовете повърхност: жълто – тревиста; зелена – средна и висока растителност; оранжево – сгради; сиво – запечатана повърхност.

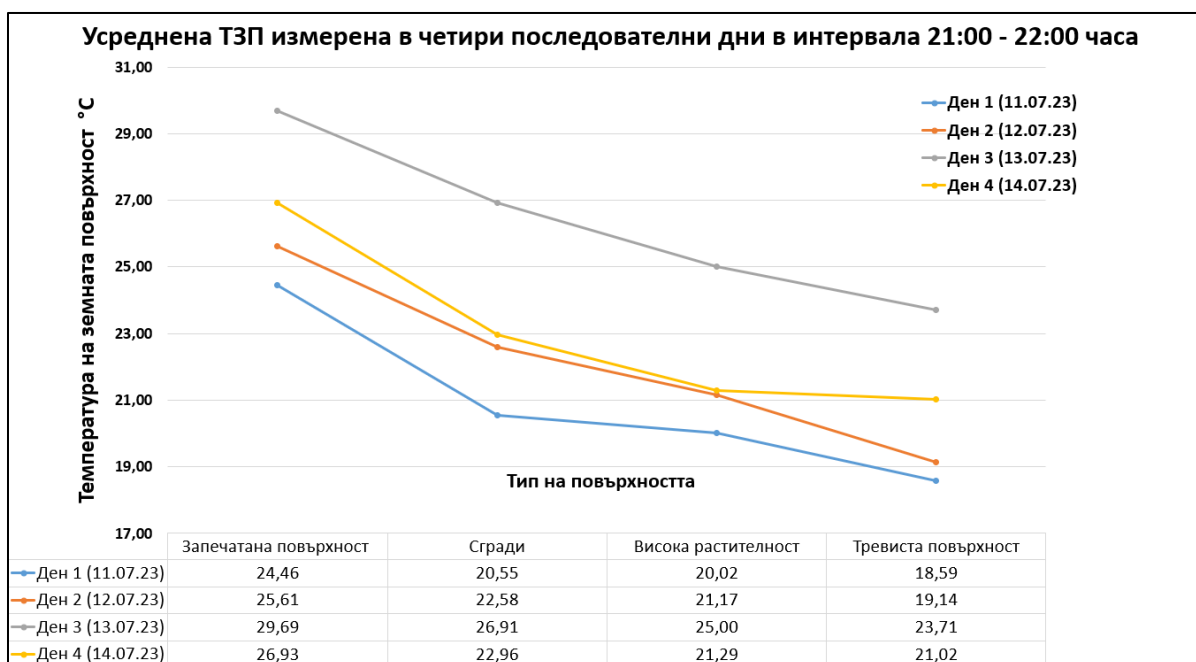
Ден - 1	MEAN	STD	MEDIAN
Запечатана повърхност	24,46	2,92	24,80
Сгради	20,55	4,00	21,08
Средна и висока растителност	20,02	1,91	20,12
Тревиста повърхност	18,59	2,96	18,23

Ден - 2	MEAN	STD	MEDIAN
Запечатана повърхност	25,61	3,05	25,74
Сгради	22,58	3,61	22,84
Средна и висока растителност	21,17	2,39	21,45
Тревиста повърхност	19,14	3,42	18,73

Ден - 3	MEAN	STD	MEDIAN
Запечатана повърхност	29,69	3,39	29,76
Сгради	26,91	4,09	27,02
Средна и висока растителност	25,00	2,48	24,99
Тревиста повърхност	23,71	3,48	23,30

Ден - 4	MEAN	STD	MEDIAN
Запечатана повърхност	26,93	3,27	27,07
Сгради	22,96	3,39	22,96
Средна и висока растителност	21,29	1,88	21,10
Тревиста повърхност	21,02	3,03	20,76

Таблица 4. Статистическа информация за усреднена стойност, стандартно отклонение и медиана на температура на различните типове земна повърхност в рамките на четирите дни на измерване.



фиг. 18. Усреднени ТЗП за четирите основни типа изследвана повърхност.

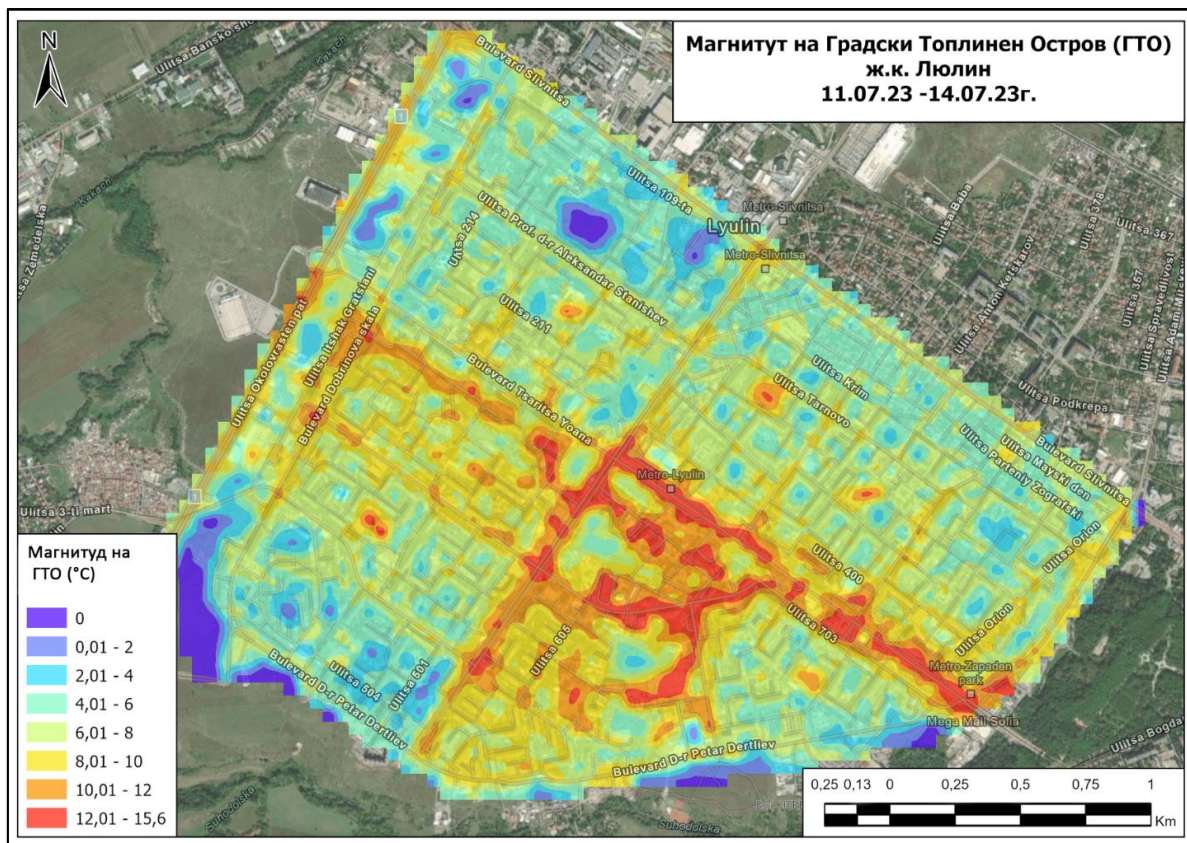
Резултати ясно показват, че въпреки това да са последователни дни и най-топлите в избрания период, съществуват разлики в средните температури за едни и същи типове повърхност. Като най-топъл от четирите дни се определя третият – 13.07.23. Впечатление прави постепенното увеличаване на температурите на повърхността през първите два дни достигайки най-високите си стойности в периода на заснемане във вечерните часове на третия ден и тяхното отслабване във вечерните часове на четвъртия ден, който бележи старта на започващото захлаждане (отминаване на горещата вълна). Графиката категорично показва взаимовръзката на най-високите усреднени стойности за ТЗП със запечатаните повърхности, както и най-ниските установени в териториите заети основно с тревиста растителност.

Въпреки различията в измерените средни температури през четирите дни от получените резултати лесно могат да се установят сходни стойности в интензитета между различните типове повърхности за отделните дни, което от своя страна прави данните напълно приложими за подобен тип изследване.

Изготвени са четири карти на температура на земната повърхност целящи да представят особеностите в степента на нагрятоост на различните типове повърхност за всеки един от четирите дни на заснемане.

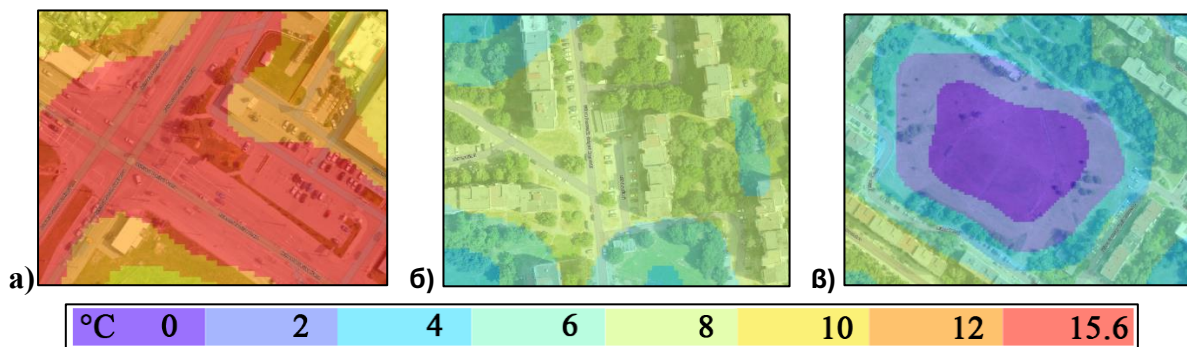
С особена важност при изследване на ГТО е неговият интензитет и темпорална изменчивост. Интензитетът на ГТО може да се определи като разлика между температурите на елементите в урбанизираното пространство и заобикалящите ги отворени, слабо урбанизирани пространства (Rizwan, A., et. al. 2008) За да бъде изчислен магнитудът на ГТО по време на дните, в които е извършено термалното заснемане са заснети и ограждащи, не урбанизирани и слабо урбанизирани територии, които в последствие да бъдат използвани като референтни стойности за ТЗП в извън урбанизираните район. Използвайки термалните данни в границите на изследваната територия и събраните такива в прилежащите територии в ГИС среда е изчислен магнитуд на ГТОП за ж.к. Люлин (фиг. 19) (Приложение 1).

От този модел ясно се вижда концентрация на зони с висок интензитет в рамките на централната част и по протежение на основните булеварди в района, където има значителна концентрация на запечатани изкуствени повърхности. Стойностите на ТЗП, в изследвания период, в тези участъци достигат до почти 16 °C по-високи в сравнение с тези извън урбанизираните територии. Вижда се че зоните, които не са в непосредствена близост до големите булеварди и широкоплощни запечатани пространства са с по-нисък магнитуд и съответно температурни стойности много по-близки от тези измерени извън урбанизираното пространство (до 2 – 4 °C). Преходните зони между тези с нисък процент на запечатани, неестествени повърхности и тези с висок дял на изкуствените повърхности са с 5 - 8 °C по-високи ТЗП спрямо измерените извън урбанизираните територии.



Фиг. 19. Карта на магнитуд на градски топлинен остров в границите на ж.к. Люлин за периода 11.07.23-14.07.23. *За визуализацията е използвана кубична (cubic) интерполация.

За да бъдат представени по-ясно някои от морфологичните особености на тези зони с разлики в интензитета на проявление на ГТО са изготвени няколко фрагмента с по-високо ниво на детайл и пространствена разделителна способност. (фиг 20)



Фиг. 20. Интензитет на ГТО в зони с а) преобладаващ дял на запечатани изкуствени, б) равномерно отношение на запечатани и естествени и в) преобладаващо дял на естествените типове повърхност

В рамките на изследването е извършено и z-трансформиране на стойностите на температурата, като е картографирано пространственото разпределение на различните степени на топлинно натоварване в изследваната територия. Процесът е подобен на този използван в изследването на ефекта на ГТО през 2019г. Резултатите са категоризирани в четири класа (най-благоприятен, благоприятен, по-малко благоприятен и най-неблагоприятен) въз основа на стандартизираните стойности на температурата от приложените z-трансформации (Приложение 2).

4.2 Оценка на соларен потенциал за покривни пространства на жилищни сгради в ж.к. Люлин (град София)

Вторият изследователски казус е пряко насочен към друга важна роля на градската морфология за използване на един от сериозните ресурси на градската среда - покривните конструкции и пространства. В казуса е приложен същият геоинформационен модел за градската морфология на Люлин, който е използван и при изследване и картографиране на ефекта на ГТОП.

През последните години се наблюдава значителен ръст на научните изследвания и засилен интерес към разкриването на потенциала за възобновяема енергия на градските пространства и особено на покривните пространства на жилищните сгради. Тази промяна отразява нарастващото осъзнаване на необходимостта от преход към устойчиви енергийни източници (Fakhraian E., et. al. 2021). Напредъкът в технологиите, съчетан с по-голям акцент върху екологичната отговорност, много ясно катализира тази тенденция през последните няколко години.

Тази част от изследователската разработка адаптира и прилага метод за оценка на фотоволтаичният потенциал на част от сградите в границите на ж.к. Люлин в град София с помощта на геопространствени технологии за събиране, анализиране и визуализиране на пространствена информация. Територията на изследване попада в северозападните части на урбанизираното пространство на град София, по-далеч от планината Витоша, което предразполага да получава по-голямо количество слънчева радиация през годината, за разлика от по югозападните и южни квартали на града, които се намират по-близо или в подножието на планината. Жилищен комплекс Люлин е най-големият жилищен комплекс в Столицата и този с най-голямо население, което го прави подходящ за пример демонстриращ пригодността на избраният метод за оценка на теоретичния соларен потенциал на покривните пространства. Освен тези две причини района на ж.к. Люлин се характеризира и с голям дял на жилищните сгради тип панелни блокове, строени през 70-те години. Формата и физическите параметри на покривните пространства на тези сгради предполагат значителен потенциал за генериране на слънчева електроенергия.

Точността и надеждността на събраните геопространствени данни относно градските морфологични структури са от съществено значение за определяне на реалният или близък до него слънчев потенциал на дадена област. Без точна информация за височината на сградите, ориентацията им и заобикалящите ги препятствия (обекти), оценките на слънчевото греене са изначално погрешни.

За оценка на соларния потенциал е избран и използван разработен от обучителният екип на ESRI метод³, който е допълнително адаптиран и надграден за целите на изследването.

³ <https://learn.arcgis.com/en/projects/estimate-solar-power-potential/>

Като първи етап в този анализ са дигитализирани покривните граници. Извършена е детайлна дигитализация на покривните пространства на част от жилищните сгради разполагащи с плоски покривни повърхности като към тях са добавени и част от детските градини и училищата в границите на изследваната територия. Покривните пространства на детските градини и училищата в района са добавени поради причината, че разполагат със значителна заравнена част, която в повечето случаи не се използва, което е установено след подробна визуална проверка на тези обекти в събраните геопространствени данни за района. Поради високата пространствена разделителна способност в процеса по дигитализиране на векторните граници е извършено и определяне на векторни граници за различните обекти, част от покривното пространство или прикрепени към него, като асансьорни шахти, комини, тръби, антени, капандури, климатици и други. Това дава възможността тези обекти да бъдат взети предвид в процеса по пресмятане на теоретичният соларен потенциал на тези пространства.

В процеса по дигитализация в рамките на изследваната територия са детайлно векторизирани границите на малко над 1 600 покривни пространства преброени спрямо слоя с официални кадастрални граници на сградите за изследвания район. В рамките на тези граници детайлно са дигитализирани и над 10 000 елементи и обекти, оказващи влияние върху слънцегреенето и поставянето на фотоволтаични системи (фиг. 21).



Фиг. 21. Карта на дигитализирани покривни пространства в границите на изследваната територия.

След детайлното дигитализиране на покривните пространства, е извършено моделиране на соларната радиация, като е изчислена теоретично постъпилата слънчева радиация в границите на всяко покривно пространство. Използваният модел генерира

насочен нагоре полусферичен изглед тип „fisheye” за всеки пиксел в цифровия модел на релефа. Тези полусферични изгледи се използват за изчисление на осветеността на всеки пиксел в растерния слой и създаване на по-точна карта на слънчевата радиация. Моделът може да изчислява интегрирано слънцегреене за всякакъв период от време. Той отчита географската ширина и надморска височина на мястото, неговата ориентация спрямо север, засенчването от околния релеф и обекти, дневните и сезонните промени в ъгъла на слънцето и атмосферните затихвания (Fu, P., 2000)

При прилагането на описаното моделиране на слънчевата радиация в ArcGIS Pro чрез инструмента Area Solar Radiation са използвани генерираните от фотограметричната обработка цифров модел на повърхността DSM, както и детайлно дигитализираните граници на покривните пространства, като територия, в която да бъдат извършени изчисленията. Като период, за който да бъде изчислена слънчевата радиация, е определена цяла календарна година с интервал на отделни изчисления през един час, и са избрани 16 посоки на изчисление за всеки един пиксел.

След проведена консултация с експерти е установено, че отделните части от покривната повърхност трябва да получават поне 800 kWh/m² годишно, поради което в ГИС среда от слоя с информация са премахнати пикселни клетки с по-ниска от посочената стойност.

В процеса на определяне на теоретичния соларен потенциал за избраните покривни пространства е необходимо допълнително филтриране на данните, като се използват ключови параметри като анализ на наклона на разглежданите пространства, както и оценка на изложението на покривите и отделно на техните елементи. Тези условия служат като основни фактори за определяне на най-подходящите покриви за изграждане на фотоволтаични системи.

Изготвеният след допълнителната обработка растерен слой на практика предоставя информация както за най-подходящите и високо енергийни участъци от избраните покривни пространства, така и информация за площта на пригодните, отговарящи на избраните критерии повърхности. Информацията за годишния соларен потенциал на всеки пиксел, както и информацията за тяхната площ са използвани за да бъде пресметната колко соларна радиация получава всеки от покривите, ако използва само подходящото си пространство. За да бъде постигнато това е използвана зонална статистика в ГИС среда.

Във финалния етап по оценка на соларния потенциал на покривите спрямо използвания метод е изчислена годишната соларна радиация за всеки покрив и тя е трансформирана в теоретично произведена електрическа енергия. Стойностите за всеки покрив са пресметнати като е умножена подходящата площ на всеки покрив по средната слънчева радиация за квадратен метър, като стойностите са трансформирани в MWh, за да се избегне да останат прекалено големи и трудни за интерпретация.

Спрямо адаптираният в това изследване метод за оценка на соларния потенциал на покривните пространства, количеството електроенергия, което слънчевите панели могат да произведат не зависи само от слънчевата радиация, но и от ефективността на

слънчевите панели и коефициент на полезно действие на инсталацията. Според проведена консултация с експерти ефективността се определя на 22 %, а коефициент на полезно действие на 86 %. За да се изчисли количеството електроенергия, което разглежданите покривни пространства могат да произведат (E) е използвана формулата:

$$E = \text{“Използваема CP”} * 0.22 * 0.86$$

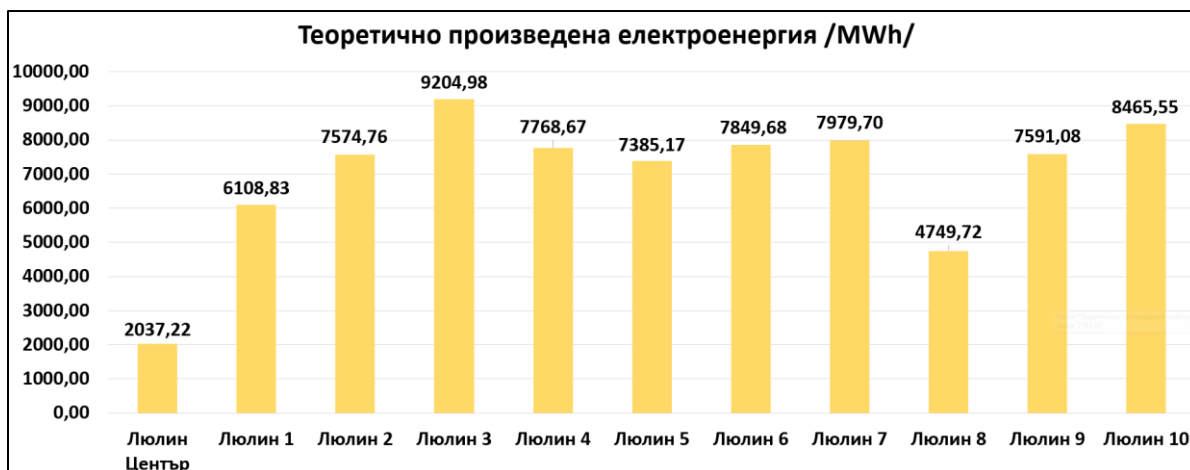
Изготвена е карта на теоретичен соларен потенциал на покривните пространства на жилищните сгради тип панелно строителство в границите на ж.к. Люлин (Приложение 3).

При статистическият анализ на получените резултати става ясно, че общата теоретично произведена електрическа енергия от подходящите покривни пространства на изследваните сгради от тип панелни е 76 715,35 MWh годишно. Максималната изчислена електроенергия за един покрив в рамките на изследваната територия 476,68 MWh, а минималната такава е 3,67 MWh. Всяко от анализирани покривни пространства средногодишно произвежда 34.21 MWh (фиг. 22). Високата стойност за стандартното отклонение – 28,49 в получените данни е ясен индикатор за наличието на различни по-соларен потенциал покривни пространства.



Фиг. 22. Статистическо разпределение на теоретично произведената електроенергия в границите на анализирани покривни пространства

Получените данни са използвани за визуализация на теоретичния потенциал на изследваните покривни пространства в отделните части на ж.к. Люлин, като оценката е извършена на ниво квартали (фиг. 23). Тези резултати от анализа са с голямо значение в областта на планирането на възобновяемата енергия в градска среда, като предоставят безценни сведения за пространственото разпределение на слънчевите ресурси в рамките на посочения географски регион. Оценка на слънчевия потенциал в границите на този тип покривни пространства на ниво квартал не само дава възможност за детайлно разбиране на наличните възобновяеми енергийни ресурси, но също така полага основите за вземане на информирани решения в областта на градското планиране и устойчивото енергийно развитие.



Фигура 23. Теоретично произведена електроенергия (в МВч) по квартали.

Изчислената средна стойност на теоретично произведена електроенергия от подходящите пространства на изследваните покривни граници на ниво квартал е 6974,12 MWh годишно. Потенциалът на повечето квартали е сравнително равномерно разпределен и се движи малко над средната стойност, като в тази група са кварталите Люлин – 1; 2; 4; 5; 6; 7 и 9. С най-висока стойност е квартал Люлин – 3 - 9204,98 MWh, като с близка до тази стойност е и ж.к. Люлин – 10. С по-нисък потенциал спрямо средната стойност са кварталите Люлин – 8 и Люлин – Център, като най-нисък потенциал има Люлин – Център с едва 2037,22 MWh. Основната причина за така представеното разпределение е размерът на подходящата площ. Има положителна корелационна зависимост между размерът на подходящата площ и теоретично произведената електроенергия за една година, което означава, че колкото повече е подходящата площ, толкова повече електроенергия би могла да бъде произведена. Пресметнатите стойности не характеризират общият соларен потенциал на разгледаните квартали, а само потенциалът на избраните и анализирани покривни пространства на тип панелни жилищни сгради.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изследването е приложен иновативен подход за нашата страна, свързан с анализирането на морфологичната разнородност на градските територии, като за тази цел прилага едни от най-съвременните и създадени за тази цел геопространствени технологии. Създадени са геопространствени модели, които да могат да бъдат взети предвид при планирането на градските територии и решаването на важни проблеми в тях. Този тип интегрирани геопространствени модели позволяват по-добро разбиране на сложните хибридни геосистеми, като каквито можем да определим съвременните градове.

Създадена е информационна основа за градската морфология, на чиято база да се осъществява по ефективно моделиране и анализ на ефекта, интензитета и пространствената конфигурация на градския топлинен остров на повърхността (ГТОП). Използваният подход е част от цялостна методика за такива изследвания, която вече е публикувана в реферирани списания с импакт фактор.

Разработен и приложен е геоинформационен модел на градската морфология в оценката на соларния потенциал на покривните пространства в ж.к. Люлин. Макар тя да се базира на съществуваща методология, на база използваните подходи и методи са постигнати много по-прецизни резултати, с реални практико-приложни възможности. Представените резултати показват значителен потенциал на изследваните покривни пространства за инсталиране на фотоволтаични системи, което при евентуална, дори частична реализация ще доведе до понижаване на енергийната зависимост и устойчиво развитие на района. Надграждането на оценката с описаното в предишните глави приложение на данни от БЛС осигури получаването на по-детайлни и комплексни прогнозни стойности.

Изследването ясно демонстрира, че въвеждането на геопространствени данни и технологии в процесите за градско управление и планиране е от основно значение за създаване и поддържане на устойчиво развитие. Подробно представените примери доказват, по безспорен начин, възможността експертите да получават по-детайлна и вярна информация, която да спомага за вземането на информирани решения, базирани на доказателства. Въз основа събраната информация и техническите способности на тези технологии е постижимо създаването на симулации и модели на разнородни сценарии, свързани с градската морфология и среда, което е с критична важност за прогнозирането на бъдещи изменения и проблеми в тези зони.

Едно от големите предимства на създадените геоинформационни модели, е възможността същите да а бъдат разширени и адаптирани за други урбанизирани територии, което ще позволи анализи на сравнение и обмен на добри практики за отделните градове.

В заключение, може да се каже, че геопространствените технологии изпълняват критична роля в трансформацията на подходите към умно градско планиране. Тези технологии са необходим инструментариум за създаването на по-екологично чисти, здравословни и ефективни урбанизирани пространства, отговарящи в по-висока степен на съвременното общество. Настоящото изследване не само доказва значимостта на геопространствените технологии, но и предлага конкретни модели и методики, които могат да бъдат приложени на практика, за подобряване качеството на живот в урбанизираните територии. Резултатите изтъкват значението на изследванията и иновациите в полето на геопространствените технологии и тяхното използване в градското управление и планиране. Само чрез интегриран подход между съвременни технологии, мултидисциплинарни изследвания и пряко участие на обществеността е възможно да бъде постигнато устойчиво и благоприятно развитие на нашите градове.

Приноси на научното изследване:

1. Приложен е иновативен, за страната, подход за събиране на геоданни за пространствено характеризирани и анализирани на морфологичната диференциация на градските територии.
2. Създаден е геопространствен модел на градската среда, с помощта на геопространствени технологии, който може да бъде приложен при зонирането и планирането на градските територии за решаване на важни проблеми в тях.
3. Разработена и приложена е методика за моделиране и анализ на ефекта и интензитета на градския топлинен остров на повърхността, с помощта на БЛС, като тя е част от цялостна методика изготвена от колектив от автори, и публикувана в реферирани списания с импакт фактор.
4. Приложен е метод за оценка на соларния потенциал на покривните пространства, който е подобрен и адаптиран за границите на страната, като по този начин са постигнати прецизни резултати с реални практико-приложни възможности.

Списък на публикациите по темата на дисертационния труд:

- Dimitrov, S., Popov, A., Iliev, M., „Mapping and assessment of urban heat island effects in the city of Sofia, Bulgaria through integrated application of remote sensing, unmanned aerial systems (UAS) and GIS,“ Proc. SPIE 11524, Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020), 115241A (26 August 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2571967>
- Dimitrov, S.; Popov, A.; Iliev, M. An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. Atmosphere 2021, 12, 1370. <https://doi.org/10.3390/atmos12111370>

Литература

- Oliveira, Vítor. (2020). Urban Morphology. 10.1093/obo/9780190922481-0004.
- Oke TR, Stewart I. Local climate zones for urban temperature studies. Bull. American Meteorological Society. 2012; 93:1879–1900.
- A. Al Furjani, Z. Younsi, A. Abdulalli et al., Enabling the city information modeling CIM for urban planning with OpenStreetMap OSM, in The Fourth International Conference for Geospatial Technologies—Libya GeoTec 4 (2020)
- Allegrini, J.; Carmeliet, J. Coupled CFD and building energy simulations for studying the impacts of building height topology and buoyancy on local urban microclimates. Urban Clim. 2017, 21, 278–305
- Avdan, U., Jovanovska, G., 2016. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. J. Sens. 2016, 1–8.
- Biljecki, F., et al., 2021b. Extending CityGML for IFC-sourced 3D city models. Automation in Construction, 121, 103440."
- Chiaradia, Alain. (2019). Urban Morphology/Urban Form. 1-6.10.1002/9781118568446.eurs0382.
- Dimitrov, S., Popov, A., Iliev, M., „Mapping and assessment of urban heat island effects in the city of Sofia, Bulgaria through integrated application of remote sensing, unmanned aerial systems (UAS) and GIS,“ Proc. SPIE 11524, Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020), 115241A (26 August 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2571967>
- Dimitrov, Stelian, Anton Popov, and Martin Iliev. 2021. "An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria" Atmosphere 12, no. 11: 1370. <https://doi.org/10.3390/atmos12111370>
- Dimitrov, Stelian, Martin Iliev, Bilyana Borisova, Lidiya Semerdzhieva, and Stefan Petrov. 2024. "UAS-Based Thermal Photogrammetry for Microscale Surface Urban Heat Island Intensity Assessment in Support of Sustainable Urban Development (A Case Study of Lyulin Housing Complex, Sofia City, Bulgaria)" Sustainability 16, no. 5: 1766. <https://doi.org/10.3390/su16051766>
- "Dukai, B., et al., 2020. Generating, storing, updating, and disseminating a country-wide 3D model. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIV-4/W1-2020:27–32."
- Emmanuel MPR, Mahanama PKS, Perera NGR. Projected urban development, changing “Local Climate Zones” and relative warming effects in Colombo, Sri Lanka. Intergovernmental Panel on Climate Change (ICCP) Colombo; 2013.
- Fibaek, C.S., Keßler, C., and Arsanjani, J.J., 2021. A multi-sensor approach for characterising human-made structures by estimating area, volume and population based on sentinel data and deep learning. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 105, 102628.
- Fu, P., and P. M. Rich. 2000. The Solar Analyst 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA

- G. Christmann, M. Schinagl, Digitalisation in everyday urban planning activities: Consequences for embodied practices, spatial knowledge, planning processes, and workplaces. *J Urban Manag* 12, 141–150 (2023)
- Gil, J., 2020. City information modelling: a conceptual framework for research and practice in digital urban planning. *Built Environment*, 46 (4), 501–527.
- Labetski, A., Vitalis, S., Biljecki, F., Arroyo Ogori, K., & Stoter, J. (2022). 3D building metrics for urban morphology. *International Journal of Geographical Information Science*, 37(1), 36–67. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2103818>
- Lucks, L., et al., 2021. Improving trajectory estimation using 3D city models and kinematic point clouds. *Transactions in GIS*, 25 (1), 238–260
- M. A. Rizwan, Y. C. L. Dennis, and L. Chunho, “A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island,” *J. Environ. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 120–128, 2008
- Noardo, F., et al., 2021. Reference study of CityGML software support: the GeoBIM benchmark 2019—Part II. *Transactions in GIS*, 25 (2), 842–868."
- Nys, G., and Billen, R., 2021. From consistency to flexibility: a simplified database schema for the management of CityJSON 3D city models. *Transactions in GIS*, 25 (6), 3048–3066.
- Peck, R.; Olsen, C.; Devore, J.L. *Introduction to Statistics and Data Analysis*, 4th ed.; Brooks/Cole: Boston, MA, USA, 2012; p. 912
- Q. H. Weng, D. S. Lu, and J. Schubring, “Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, no. 4, pp. 467–483, 2004
- Qin, Z. & Karnieli, A., 1999. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(12), pp. 2367–2393.
- Ren, C., et al., 2020. Developing a rapid method for 3-dimensional urban morphology extraction using open-source data. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101962."
- Santhanavanich, T., and Coors, V., 2021. CityThings: an integration of the dynamic sensor data to the 3D city model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48 (3), 417–432.
- Soltanifard, H., Farhadi, R., Mansourian, H. (2024). City Information Modelling and Sustainable Development: The Role of CIM in Achieving Sustainable Urbanization. In: Cheshmehzangi, A., Batty, M., Allam, Z., Jones, D.S. (eds) *City Information Modelling. Urban Sustainability*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9014-6_2
- Soux, A., Voogt, J. & Oke, T.R., 2004. A model to calculate what a remote sensor “sees” of an urban surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 111(1), pp. 109–132
- Touchaei, A., and Wang, Y., 2015. Characterizing urban heat island in Montreal (Canada)—effect of urban morphology. *Sustainable Cities and Society*, 19, 395–402.
- Virtanen, J.-P., et al., 2021. Near real-time semantic view analysis of 3D city models in web browser. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (3), 138.
- Vitalis, S., Arroyo Ogori, K., and Stoter, J., 2020. CityJSON in QGIS: development of an opensource plugin. *Transactions in GIS*, 24 (5), 1147–1164.

Wysocki, O., et al., 2021. Plastic surgery for 3D city models: a pipeline for automatic geometry refinement and semantic enrichment. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4-2021, 17–24.

Xu, Y., et al., 2017. Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, 167, 212–224.

Z. Allam, A. Sharifi, S.E. Bibri et al., The metaverse as a virtual form of smart cities: Opportunities and challenges for environmental, economic, and social sustainability in urban futures. *Smart Cities* 5, 771–801 (2022)

Zheng, B.H.; Bedra, K.B.; Zheng, J.; Wang, G.G. Combination of Tree Configuration with Street Configuration for Thermal Comfort Optimization under Extreme Summer Conditions in the Urban Center of Shantou City, China. *Sustainability* 2018, 10, 4192

Zhu, X.X., et al., 2022. The urban morphology on our planet – global perspectives from space. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112794

Приложение 3

