

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
**Fakulta životního prostředí**  
**Katedra vodního hospodářství a environmentálního**  
**modelování**



**Česká  
zemědělská  
univerzita  
v Praze**

**Možnosti využití Google Earth Engine ve studiu klimatu**  
**města**  
**Bakalářská práce**

**Jaromír Janda**  
**Územní technická a správní služba**

**Mgr. Aleš Urban, Ph.D.**

**© 2021/2022 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jaromír Janda

Krajinářství

Územní technická a správní služba

Název práce

**Možnosti využití Google Earth Engine ve studiu klimatu města**

Název anglicky

**Application of Google Earth Engine in the urban climate assessment**

---

### Cíle práce

Družicové snímky představují užitečný nástroj pro studium klimatu města. Např. množství emitovaného záření v termální části elektromagnetického spektra družicových snímků lze využít jako informaci o teplotních poměrech studovaného území. Pro dosavadní studium družicových snímků bylo nutné manuální procházení rozsáhlých databází typu USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Aplikace Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com/>) představuje výrazný posun v přístupnosti satelitních dat a rychlosti jejich zpracování.

### Metodika

Cílem práce je seznámit se s problematikou klimatu města. Na základě rešerše aktuální zahraniční odborné literatury budou vyhodnoceny možnosti využití družicových snímků v analýze klimatu města a jeho časoprostorových změn. Důraz bude kladen na práce zabývající se časoprostorovými změnami v rozložení povrchové teploty v městském prostředí, využívající aplikaci GEE. Důležitým aspektem práce bude seznámit se s prostředním GEE, programovacím jazykem, funkcemi a s dostupnými soubory dat.

## Doporučený rozsah práce

30-50

## Klíčová slova

klima města, tepelný ostrov města, dálkový průzkum země, Google Earth Engine

---

## Doporučené zdroje informací

- Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., Gong, P., Yang, J., Bai, Y., Zheng, Y., Zhu, Z., 2017. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sens. Environ.* 202, 166–176. doi:10.1016/j.rse.2017.02.021
- Kumar, L., Mutanga, O., 2018. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. *Remote Sens.* 10, 1–15. doi:10.3390/rs10101509
- Ravanelli, R., Nascetti, A., Cirigliano, R.V., Di Rico, C., Leuzzi, G., Monti, P., Crespi, M., 2018. Monitoring the impact of land cover change on surface urban heat island through Google Earth Engine: Proposal of a global methodology, first applications and problems. *Remote Sens.* 10, 1–21. doi:10.3390/rs10091488

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

## Vedoucí práce

Mgr. Aleš Urban, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

---

Elektronicky schváleno dne 14. 1. 2022

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 21. 1. 2022

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: Možnost využití Google Earth Engine ve studiu klimatu města vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Sedlčanech dne 31.března 2021

---

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Aleši Urbanovi, Ph.D. za odborné vedení, užitečné rady a trpělivost. Dále si velké poděkování zaslouží moje přítelkyně a má rodina za velkou psychickou podporu a utvoření klidného zázemí pro psaní této práce.

## **Abstrakt**

Analýza družicových snímků za využití metod dálkového průzkumu Země (DPZ) představuje v současnosti hojně využívaný nástroj pro monitorování a modelování změn zemského povrchu a atmosféry, včetně městských prostředí. Aplikace Google Earth Engine (GEE), poskytující globální archiv volně dostupných satelitních dat a výpočetní kapacitu pro jejich zpracování, představuje výrazný posun v možnostech využití metod DPZ ve vědách o Zemi.

Cílem této práce bylo zpracovat literární rešerši odborné zahraniční literatury a vyhodnotit možnosti využití družicových snímků v analýze klimatu města a jeho časoprostorových změn. Důležitým aspektem práce bylo seznámit se s prostředím GEE, programovacím jazykem, funkcemi a s dostupnými soubory dat, které GEE nabízí. Funkce prostředí GEE byly demonstrovány pomocí praktické ukázky výpočtu prostorové mapy rozložení povrchové teploty v Praze ve vybraných letech.

Na základě rešerše vybraných případových studií a výsledků vlastní praktické ukázky jsou v práci diskutovány možnosti směřování analýzy časoprostorových změn povrchové teploty v Praze za využití nástrojů GEE.

**Klíčová slova:** klima města, tepelný ostrov města, povrchová teplota, dálkový průzkum země, Google Earth Engine

## **Abstract**

The analysis of satellite images using remote sensing (RS) methods is currently a widely used tool for monitoring and modeling changes in the Earth's surface and atmosphere, including urban environments. The Google Earth Engine (GEE) application, which provides a global archive of freely available data and computing power for their processing, represents a significant shift in the possibilities of using remote sensing methods in the Earth sciences.

The aim of this work was to review international literature and to evaluate the possibilities of using satellite images in the analysis of the urban climate and its spatio-temporal changes. An important aspect of the work was to get acquainted with the GEE environment, programming language, functions and available data sets that GEE offers. The functions of the GEE environment were demonstrated by means of practical examples of calculating the spatial map of the surface temperature distribution in Prague in selected years.

Based on a search of selected case studies and the results of our own practical examples, further options of the analysis of spatiotemporal changes in surface temperature in Prague using GEE tools are discussed.

**Keywords:** urban climate, urban heat island, land surface temperature, remote sensing, Google Earth Engine

## **Seznam zkratek**

- AUHI** Atmospheric Urban Heat Island
- CE** Climate Engine
- DN** Digital number
- DPZ** Dálkový průzkum Země
- ERTS** Earth Resources Technology Satellite
- ESA** European Space Agency
- GEE** Google Earth Engine
- IRS** Indian Remote Sensing
- LC** Land Cover
- LU** Land Use
- LST** Land Surface Temperature
- MODIS** Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- MSI** MultiSpectral Instrument
- NASA** National Aeronautics and Space Administration
- NDVI** Normalized Difference vegetation Index
- NIR** Near Infrared
- OLI** Operational Land Imagery
- OSN** Organizace spojených národů
- RGB** Red–Green–Blue
- RS** Remote sensing
- SPOT** Satellite for observation of Earth
- SUHI** Surface Urban Heat Island
- SWIR** Short–Wavelength Infrared
- TIRS** Thermal Infrared Sensor
- TOA** Top of atmosphere radiance
- UHI** Urban heat island
- USGS** United States Geological Survey



<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Cíle práce .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Dálkový průzkum Země .....</b>	<b>14</b>
3.1	Historie .....	14
3.2	Charakteristika.....	14
3.3	Současnost DPZ v městském prostředí .....	16
3.4	Družicová data.....	18
3.4.1	Landsat.....	19
3.4.2	MODIS .....	21
3.4.3	Sentinel .....	22
<b>4</b>	<b>Tepelný ostrov města .....</b>	<b>23</b>
4.1	Příčiny vzniku tepelného ostrova .....	24
4.2	Typy městského tepelného ostrova .....	25
4.2.1	Atmosférický tepelný ostrov (AUHI).....	25
4.2.2	Povrchový tepelný ostrov (SUHI) .....	26
4.3	Společné vlastnosti tepelných ostrovů.....	26
4.4	Dopady .....	27
<b>5</b>	<b>Teplota zemského povrchu (LST) .....</b>	<b>28</b>
5.1	Princip výpočtu teploty zemského povrchu (LST).....	28
5.1.1	Výpočet spektrální záře na horní části atmosféry.....	29
5.1.2	Převod spektrální záře na horní hranici atmosféry na teplotu jasu. .....	29
5.1.3	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a vegetační poměr .....	29
5.1.4	Závěrečný výpočet LST.....	30
<b>6</b>	<b>Google Earth Engine .....</b>	<b>31</b>
6.1	Popis práce s editorem GEE.....	32
6.2	Bibliografická analýza využití GEE v odborných člancích .....	35

6.3	Možnosti využití GEE ve studiu změn prostorového rozložení povrchové teploty .....	37
6.3.1	Vliv rostoucí zástavby na zvyšující se LST.....	37
6.3.2	Souvislost mezi lidskou modifikací zemského povrchu a změnami LST .....	39
6.3.3	Vliv urbanizace na klimatické podmínky .....	43
6.3.4	Časoprostorové vzory chování letního UHI .....	44
6.3.5	Povrchová a časová analýza SUHI (povrchového městského tepelného ostrova) .....	45
6.4	Praktická ukázka výpočtu LST.....	46
6.4.1	Popis výpočtu a exportu prostorového pole povrchové teploty z GEE .....	47
6.4.2	Načtení kolekce Landsat 8 a popis výpočtu NDVI indexu .....	48
6.4.3	Popis výpočtu vegetačního poměru a emisivity .....	49
6.4.4	Export dat z GEE a finální úprava.....	50
6.4.5	Výsledek .....	51
<b>7</b>	<b>Diskuze.....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>Závěr a přínos práce.....</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>56</b>
9.1	Tištěné dokumenty .....	56
9.2	Elektronické dokumenty.....	59
<b>10</b>	<b>Seznam použitých obrázků a tabulek .....</b>	<b>61</b>

# 1 Úvod

Městské oblasti prošly za posledních 50 let dramatickými změnami jak z hlediska velikosti populace, tak z hlediska prostorového rozsahu. Více než 50 % světové populace nyní žije v městských a příměstských oblastech. Podle odhadů Organizace spojených národů (OSN) naroste tento podíl do roku 2050 na 70 % (United Nations, 2014). V absolutních počtech se odhaduje, že počet lidí žijících ve městských oblastech vzroste z dnešních 3,29 miliardy obyvatel na 6,4 miliardy obyvatel do roku 2050 a naopak počet lidí žijících ve venkovských oblastech klesne z dnešních 3,37 miliard na 2,79 miliard obyvatel v roce 2050. K největšímu nárůstu městské populace (jinak také urbanizaci) dochází v dnešní době zejména v rozvojových zemích. Urbanizace je proces migrace lidí z venkovských oblastí do měst, obvykle za účelem hledání lepší práce a lepšího života. Rychlost a rozsah urbanizace představuje nadále pro jednotlivé země i pro světové společenství obrovské výzvy. Mezi ty patří zejména změna krajiny a životního prostředí z přirozeného na městské prostředí, které se vyznačuje vysokým zastoupením antropogenních povrchů. Do této kategorie člověkem uměle vytvořených povrchů spadají nejčastěji prvky budované z asfaltu, betonu, kamení či kovu. Tyto povrchy se oproti přírodním povrchům, vyznačují odlišnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které mají významný vliv na kvalitu vodních zdrojů, ovzduší, a dokonce i mikroklimatické podmínky (Weng et al. 2018). Projekce OSN (2018) naznačují, že pokud budou současné trendy urbanizace pokračovat, celosvětový městský krajinný pokryv se zvýší o 1,2 milionu km<sup>2</sup> do roku 2050. To by znamenalo značnou ztrátu stanovišť v klíčových ohniscích biodiverzity a zničení zelené infrastruktury, která je zásadní pro pomoc oblastem přizpůsobit se dopadům změny klimatu. Potřeba technologií, které umožňují monitorování městských oblastí a člověkem způsobených rizik rychle roste. Problémy městského životního prostředí se v 21. století staly bezprecedentně naléhavými. Není to jen proto, že města jsou původci mnoha ekologických problémů od produkce odpadů po znečištění ovzduší a vody, ale také proto, že rizika dopadů globální změny klimatu na městské oblasti jsou jedna z nejvyšších (Xian, 2016).

Dálkový průzkum Země je efektivním nástrojem pro monitorování a modelování změn zemského povrchu a atmosféry, včetně městských prostředí. Politika volně přístupných satelitních dat přes platformu Google Earth Engine (GEE

<https://earthengine.google.com/>) představuje výrazný posun v přístupnosti satelitních dat a rychlosti jejich zpracování.

## **2 Cíle práce**

Tato bakalářská práce má formu literární rešerše. Cílem práce bylo seznámit se s problematikou klimatu měst a metodami dálkového průzkumu Země pro jeho zkoumání. Důležitým aspektem práce bylo seznámení se s prostředím GEE, programovacím jazykem, funkcemi a dostupnými soubory dat. Hlavním úkolem bylo vyhodnocení možností využití nástroje GEE ve studiích zabývajících se časoprostorovými změnami v rozložení povrchové teploty v městském prostředí. Součástí práce je i praktická ukázka práce s prostředím GEE na příkladu území v okolí hlavního města Prahy.

## **3 Dálkový průzkum Země**

### **3.1 Historie**

Dálkový průzkum Země (DPZ) je obor zabývající se pozorováním nebo shromažďováním informací o jevech a procesech vyskytujících se na povrchu planety Země bez nutnosti fyzického kontaktu. Výraz „dálkové snímání“ zavedli jako první geografové z amerického Úřadu pro námořní výzkum v 60. letech 20. století přibližně v době, kdy se používání špionážních satelitů začalo přesouvat z vojenské sféry do sféry civilní (Campbell a Wynne, 2011). Ačkoli v současném DPZ hrají informace získané z umělých družic jednoznačně nejvýznamnější roli, metody dálkového pozorování se datují dlouho před vypuštěním první umělé družice.

Prakticky celá astronomie je postavena na metodách dálkového pozorování nebeských jevů. O vědeckých počátcích astronomie pak můžeme hovořit od vynálezu dalekohledu v roce 1608, který umožnil zkoumání nebeských těles do většího detailu (Cracknell, 2007).

S rozvojem letectví od 19. století se začaly používat techniky dálkového snímání i pro pozorování zemského povrchu. Myšlenku fotografování povrchu Země původně uvedli do praxe balonáři v 19. století. Nejstarší známou fotografii pořídil Francouzský fotograf Gaspard Felix Tournachon známý pod pseudonymem Nadar v roce 1859 poblíž Paříže (Cracknell, 2007).

K rozvoji fotogrammetrie (vědní obor zabývající se zpracováním informací na fotografických snímcích) dochází během první poloviny 20. století, kdy se pro účely mapování začaly využívat letecké snímky. Tyto techniky byly široce využívány zejména do 70. let 20. století, kdy došlo k rozvoji družicových snímků a jejich využití pro snímání zemského povrchu (Cracknell, 2007).

### **3.2 Charakteristika**

DPZ lze obecnou definicí chápat jako měření vlastností objektů na zemském povrchu a v jeho blízkosti bez přímého dotyku za pomoci analýzy odraženého elektromagnetického záření (Campbell a Wynne, 2011). Každý pozorovaný objekt odráží, absorbuje a propouští sluneční záření o různých vlnových délkách v závislosti na jejich chemických a fyzikálních vlastnostech. Abychom porozuměli možnostem využití metod DPZ za pomoci senzorů umístěných na družicích, musíme znát principy elektromagnetického spektra. Elektromagnetické spektrum zahrnuje části elektromagnetického záření, které je viditelné i neviditelné pro lidské oči a skládá se z

tisíců vlnových délek energie. Světlo z elektromagnetické spektra, které vidíme očima zahrnuje červené, zelené a modré složky světla neboli RGB (red–green–blue). Zbytek elektromagnetického spektra není možné vidět lidskýma očima, ale může být zachyceno a nahráváno za pomoci senzoru jako jsou spektrometry. Aby spektrometr dokázal utřídit všechny vlnové délky, rozděluje spektra do skupin vlnových délek nazývaných vlnová pásma (anglicky „bands“). Spektrometry lze dále dělit na multispektrální a hyperspektrální. Zatímco multispektrální spektrometry měří v jednotkách, maximálně desítkách pásem, hyperspektrální spektrometry rozdělují pásma do stovek menších spektrálních pásem (Campbell a Wynne, 2011).

Šířka a počet pásem je to, čemu říkáme spektrální rozlišení obrazu. Vyšší spektrální rozlišení znamená více pásem, která jsou spektrálně užší. Nižší spektrální rozlišení znamená méně pásem, z nichž každé pokrývá větší část spektra. Pro různé účely se používají odlišné kombinace spektrálních pásem (tříd). Přesnější určení záleží na účelu snímku a preferencích analytika. V tab. 1 můžeme vidět rozdělení spektrálních pásem, vlnovou délku a možnosti využití u nejnovějších družic z programu Landsat.

**Tab. 1** Spektrální pásma s možností využití a vlnovou délkou u družic Landsat 8 a 9 (NASA 2021).

	<b>Spektrální pásmo</b>	<b>Vlnová délka (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Účel využití</b>
<b>1</b>	Pobřežní aerosol (COASTAL)	0,43–0,45	Pobřežní a aerosolové studie
<b>2</b>	Modré	0,45–0,51	Batymetrické mapování, rozeznávání půdy od vegetace
<b>3</b>	Zelené	0,53–0,59	Hodnocení zdravotního stavu rostlin
<b>4</b>	Červené	0,64–0,67	Rozlišení vegetačních svahů
<b>5</b>	Blízké infračervené (NIR)	0,85–0,88	Posuzování obsahu biomasy
<b>6</b>	Krátkovlnné infračervené 1 (SWIR 1)	1,57–1,65	Určení vlhkosti půd a vegetace
<b>7</b>	Krátkovlnné infračervené 2 (SWIR 2)	2,11–2,29	Dokonalejší posuzování vlhkosti půd a vegetace
<b>8</b>	Panchromatické	0,5–0,68	Ostřejší obraz území
<b>9</b>	Cirrus	1,36–1,39	Dokonalejší posuzování shluků oblaků typu cirrus
<b>10</b>	Termální infračervené 1 (TIRS 1)	10,6–11,19	Termální mapování a odhad vlhkosti půd
<b>11</b>	Termální infračervené 2 (TIRS 2)	11,50–12,51	Dokonalejší termální mapování a odhad vlhkosti půd

### 3.3 Současnost DPZ v městském prostředí

Éra civilního využití satelitních dat pro dálkový průzkum Země začala v roce 1978 s vypuštěním první vědecké družice pro pozorování vlastností zemského povrchu, dnes známou jako Landsat 1. Od roku 1972 vedla četná technická vylepšení k druhé generaci družic pro pozorování Země, jako byly pozdější družice Landsat 2, francouzský program pro pozorování Země SPOT–1 nebo indický program pro dálkový průzkum Země IRS. Od roku 1999 lze rozlišit třetí generaci družic pro pozorování Země s velmi vysokým geometrickým rozlišením (IKONOS–2, Quickbird–2 atd.) (Maktav et al. 2005).

Neustálý technický vývoj umožňuje použití družicových senzorů v rozsáhlých aplikacích, kterým dříve dominovaly senzory na leteckých platformách. To vede ke stále většímu počtu využití DPZ v městském prostředí, protože požadavky týkající se



úrovně detailů snímků v městském prostředí jsou splněny za pomoci satelitních senzorových snímačů.

Složení městské krajiny je v porovnání s přírodní krajinou značně odlišné. Na rozdíl od přirozené krajiny se města skládají z mnoha malých objektů složených z různých materiálů, které dohromady nedávají homogenní celek. Dále mají městské oblasti výrazně členitější charakter než volná krajina z důvodu trojrozměrného charakteru městské zástavby. Ta se vyznačuje hustou sítí tzv. uličních kaňonů o různé šířce, délce a hloubce v závislosti na výšce okolních budov, a různými mikroklimatickými podmínkami v závislosti na orientaci ulic, použitých stavebních materiálech apod. (Maktav et al. 2005). Tyto faktory určují, že pro aplikaci metod dálkového průzkumu Země ve městech je vyžadováno mnohem vyšší prostorové rozlišení než v případě zkoumání volné krajiny. To klade vysoké nároky na technickou kvalitu jak snímacích zařízení, tak i nástrojů pro následné zpracování a analýzu jejich výstupů (Maktav et al. 2005).

### 3.4 Družicová data

Družicová data, která lze získat z mnoha satelitních systémů, jsou v současnosti nejvyužívanější a nejpřesnější aplikací DPZ. Většina dat od provozovatelů satelitů je placených, avšak existuje několik poskytovatelů, kteří nabízejí svá data zdarma. Ve velké míře záleží na účelu družic. Data z družicových systémů provozovaných státními vědeckými institucemi (např. NASA, ESA, USGS aj.), určených pro vědecké pozorování zemského povrchu a atmosféry, jsou ve velké míře přístupná zdarma přes webové aplikace těchto institucí.

Družice lze dělit podle typu oběžné dráhy na družice s polární dráhou letu a družice geostacionární. Polární družice obíhají přes póly nad zemí v polárním směru (tj. ze severu na jih), zatímco u geostacionárních družic rychlost oběhu přesně kopíruje rychlost rotace Země, tudíž snímá stále stejné území. U polárních družic se průběžně dráha letu posouvá, takže nelze kontinuálně pozorovat stejné místo. Polární družice jsou vhodné pro uplatnění DPZ v městském prostředí, protože disponují vyšším prostorovým rozlišením než geostacionární družice. Naopak nevýhodou polárních družic je menší frekvence pořizování snímků z jednoho bodu na Zemi (viz časové rozlišení v tab. 2).

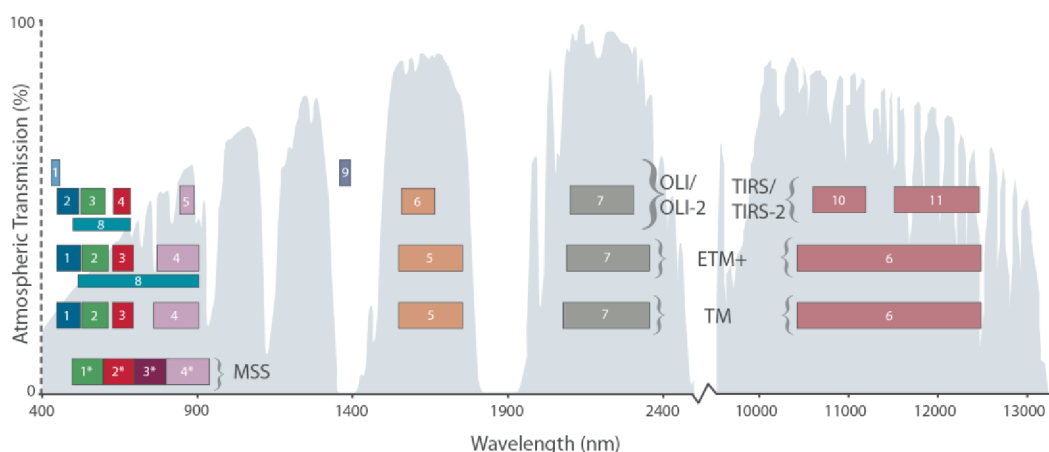
Následující příklady (viz tab. 2) družic byly vybrány s ohledem na jejich spektrální pásma a následné uplatnění v městském prostředí. Všechny vybrané družice jsou družice s polární dráhou letu. Tyto družicové systémy jsou podrobněji popsány níže.

**Tab. 2** Přehled vybraných družic a jejich specifikace.

<b>Přehled</b>	<b>Rozlišení</b>			<b>Snímací zařízení (senzory)</b>	<b>Provozovatel</b>
	<b>Prostorové (m)</b>	<b>Časové (den)</b>	<b>Spektrální pásma</b>		
Landsat-9	15, 30, 100	16	11	OLI-2, TIRS-2	NASA/USGS
Aqua, Terra (MODIS)	250, 500, 1000	1	36	MODIS	NASA
Sentinel 2A, 2B	10, 20, 60	5	12	MSI	ESA

### 3.4.1 Landsat

Landsat představuje celosvětově nejdelší nepřetržitě získávanou sbírku dat v oblasti civilního pozorování zemského povrchu od provozovatelů NASA (National Aeronautics and Space Administration) a USGS (United States Geological Survey). Pět desetiletí snímků Landsat poskytuje jedinečný zdroj pro aplikace v zemědělství, geologii, lesnictví, regionálním plánování, vzdělávání, mapování a výzkumu globálních změn. Landsat 1 byl vypuštěn 23. července 1972. V té době byl satelit známý jako Earth Resources Technology Satellite (ERTS). Byla to první družice pro pozorování Země, která byla vypuštěna s výslovným záměrem studovat a monitorovat zemského povrchu naší planety. Landsat 1 předznamenal nový věk dálkového průzkumu Země z vesmíru. Do roku 1999 bylo do vesmíru vyneseno dalších 6 družic programu Landsat. Dne 11. února v 2013 po dlouhé prodlevě byla vypuštěna nová družice Landsat 8, která měla nahradit dosluhující satelity. Nejnovějším produktem NASA a USGS je družice Landsat 9, která byla vypuštěna 27. září 2021 a je dalším milníkem pro téměř 50letý program. Landsat 9 nese dva optické multispektrální přístroje jako jeho předchůdce Landsat 8. OLI-2 (Operational Land Imager) a TIRS-2 (Thermal InfraRed Sensor), který má za úkol měřit tepelné infračervené záření. Senzor OLI-2 obsahuje 9 spektrálních pásem COASTAL (pobřežní aerosol), RGB (červené, zelené a modré), NIR (infračervené), 3x SWIR (krátkovlnné infračervené) a PAN (panchromatické). TIRS-2 operuje ve 2 spektrálních pásmech o prostorovém rozložení do 100 metrů (viz obr. 1) (NASA, 2021; USGS, 2021).



**Obr. 1** Vlnové délky jednotlivých pásem skenerů družic Landsat. Senzor MSS (4 pásma) nesl Landsat 1, 2 a 3, senzor TM (7 pásem) Landsat 4 a 5, senzor ETM+ (8 pásem) Landsat 7 a skenery OLI/OLI–2 a TIRS/TIRS–2 (11 pásem) Landsat 8 a 9 (NASA, 2021)

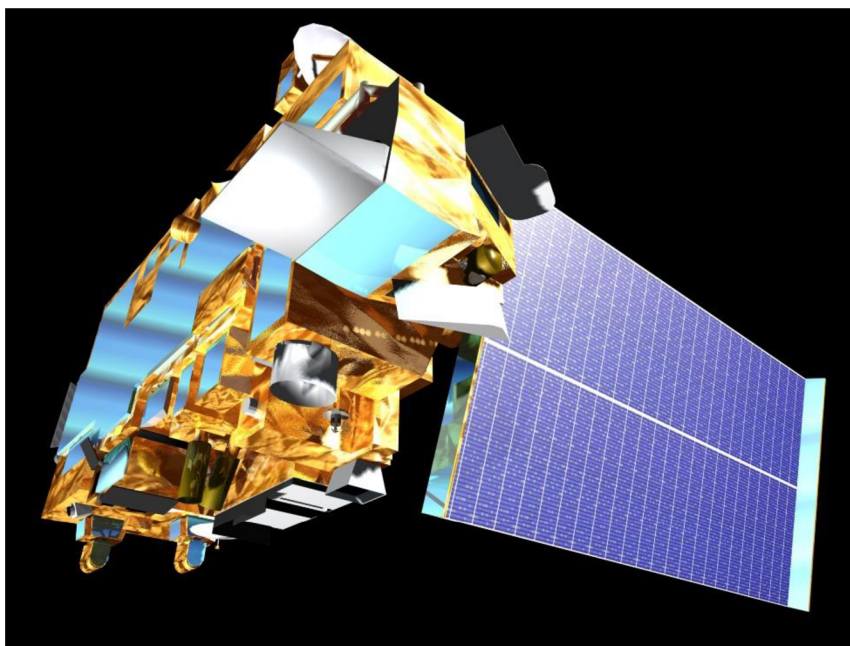
Pomocí zařízení na družicích Landsat 8 a Landsat 9 lze analyzovat informace o znečištění atmosféry, stavu korálů v oceánech, oblačnosti, zdraví vegetace, množství vody v krajině a nově o aktivních požárech. Landsat 9, stejně jako Landsat 8, měří v 11 spektrálních pásmech od viditelného až po termální infračervené spektrální pásmo (NASA, 2021; USGS, 2021).

Příběh družic Landsat bude i nadále pokračovat v příštím desetiletí s programem Landsat Next, nejnovějším členem rodiny družic Landsat. Mise Landsat Next je v současné době ve své rané fázi a návrháři mise zvažují požadavky uživatelů dat. Mise má být zahájena v roce 2029. Zvažuje se široká škála typů satelitů a přístrojů, ale všechny mají společné dvě věci: budou pokračovat ve stávajícím desetiletí dlouhém záznamu dat a budou měřit ve více než dvojnásobku spektrálních pásem oproti Landsat 8 a 9.

Cílem Landsat Next je umožnit nové aplikace pro studium kvality vody, sněhové pokrývky, zdraví půdy a vegetace a další. Nadcházejícími kroky projektu Landsat Next je dokončení studií nejlepších návrhů z předchozích misí pro dosažení stanovených cílů (NASA, 2021; USGS, 2021).

### 3.4.2 MODIS

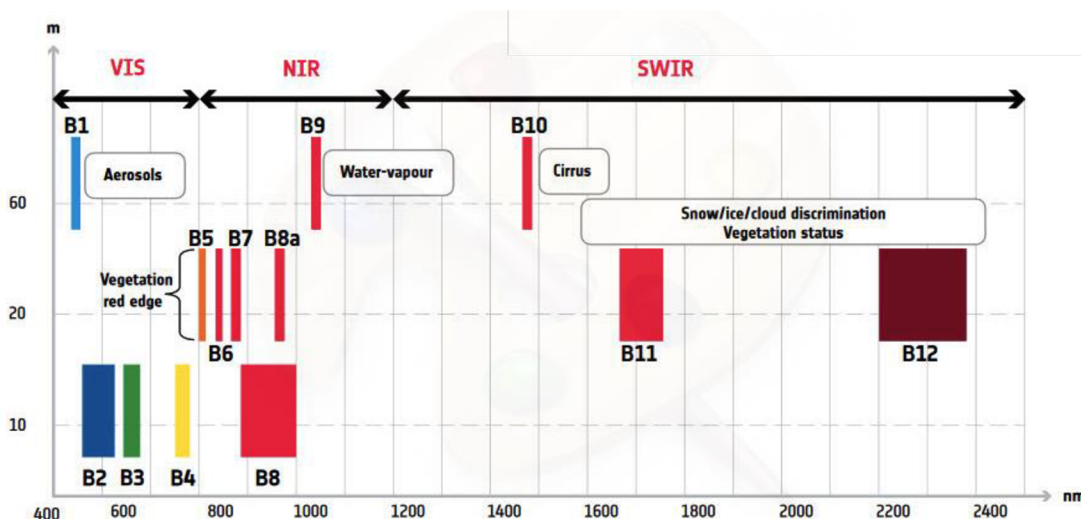
MODIS (neboli Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) je klíčový přístroj na družicích Terra (původně známý jako EOS AM-1) a Aqua (původně známý jako EOS PM-1) který provozuje společnost NASA. Oběžná dráha družice Terra kolem Země je nastavena tak, že prochází ze severu na jih přes rovník, zatímco Aqua přechází z jihu na sever. Terra MODIS a Aqua MODIS sledují celý zemský povrch každé 1 až 2 dny. Jeho detektory měří 36 spektrálních pásem mezi 0,4 a 14,4 mikrometrů a získávají data ve třech prostorových rozlišeních – 250 metrů, 500 metrů a 1 000 metrů. Sestava skenovacího zrcadla, kterou je MODIS vybaven, slouží k odrážení záření země v rozsahu skenování  $\pm 55$  stupňů a je poháněna motorovým kóděrem zkonstruovaným tak, aby fungoval při 100 % pracovním cyklu po dobu 6leté životnosti přístroje. Optický systém se skládá z dvouzrcadlového mimoosého dalekohledu, který směřuje energii do čtyř sestav refrakčních objektivů, jeden pro každou ze spektrálních oblastí VIS, NIR, SWIR/MWIR a LWIR, aby pokryl celkový spektrální rozsah. Spolu se všemi daty z dalších přístrojů na vesmírných družicích Terra a Aqua jsou data z programu MODIS přenášena na pozemní stanice ve White Sands v Novém Mexiku prostřednictvím družicového systému sledování a přenosu dat. Data jsou poté odeslána do EOS Data and Operations System (EDOS) v Goddard Space Flight Center, které provozuje společnost NASA (NASA, 2021; MODIS, 2021).



**Obr. 2** Přístroj MODIS (EUMETSAT, 2019).

### 3.4.3 Sentinel

Mise Sentinel je projekt Evropské radarové observatoře pro společnou iniciativu Copernicus Evropské komise (EK) a Evropské kosmické agentury (ESA). Copernicus je evropská iniciativa pro implementaci informačních služeb zabývajících se životním prostředím a bezpečností. Copernicus shromažďuje a poskytuje přístup jak k datům získaným z družicových pozorování Země, tak k pozemním měřením. Dále program umožňuje přístup k datům z vybraných civilních družicových systémů, které jsou zaměřeny na studium různých zemských sfér (souš, oceány, lesy, atmosféra). Pro sledování změn pokryvu Země a zjišťování zdravotního stavu vegetace jsou nejvhodnější družice Sentinel-2A, (na oběžnou dráhu vypuštěna v roce 2015) a Sentinel-2B (2017). Družice Sentinel-2 (A i B) nesou optický multispektrální sensor MSI (MultiSpectral Instrument), který je svými parametry ideální k mapování vegetace. Dále je vybaven optickým přístrojem, který vzorkuje 13 spektrálních pásem. Z toho čtyři pásma s prostorovým rozlišením 10 metrů, šest pásem s prostorovým rozlišením 20 metrů a tři pásma s prostorovým rozlišením 60 metrů viz obr. 3. Na výpočet povrchové teploty země se používá červené a infračervené spektrální pásmo s prostorovým rozlišením 10, 20 a 60 metrů. Sentinel-2A a Sentinel-2B byly vypuštěny evropským odpalovacím zařízením VEGA. Životnost satelitu je 7,25 roku, která zahrnuje tříměsíční fázi uvedení do provozu na oběžné dráze. Baterie a pohonné hmoty jsou k dispozici pro 12 let provozu, včetně potřebných manévřů na vyřazení z oběžné dráhy na konci životnosti (ESA, 2019).



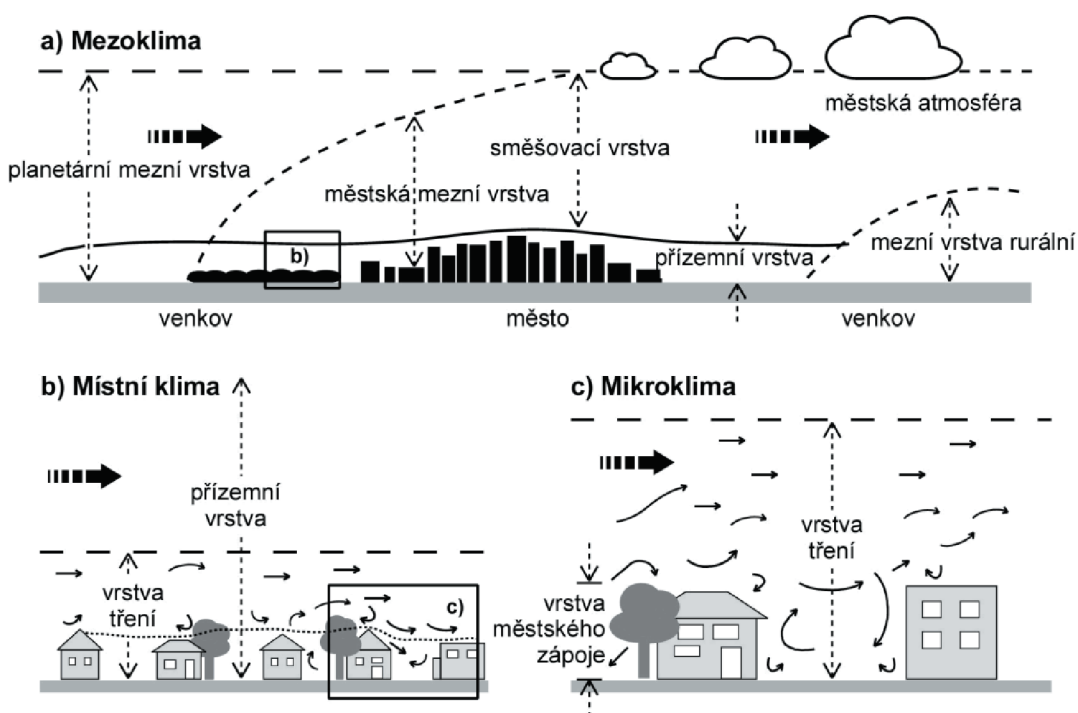
Obr. 3 Spektrální pásma družice Sentinel-2 (ESA, 2019).

## 4 Tepelný ostrov města

Jedním z možných využití satelitních snímků je zkoumání městského klimatu. Nejtypičtějším projevem městského klimatu je tzv. tepelný ostrov města.

Tepelným ostrovem města označujeme jev, kdy vzduch a povrchy v centru měst dosahují vyšších teplot než okolní krajina. Tepelný ostrov se vyznačuje specifickým chováním mezní vrstvy atmosféry (vrstva atmosféry do výšky cca 2 km nad zemským povrchem) v prostředí městské zástavby (tzv. městská mezní vrstva na obr. 4a), kde dosahuje největší mocnosti z důvodu větší drsnosti povrchu a zvýšené instability teplotního zvrstvení atmosféry. Součástí mezní vrstvy atmosféry je přízemní vrstva atmosféry, která se vyskytuje zpravidla do výšky několika metrů (viz obr. 4b).

V této části se zvláště výrazně projevují dynamické a termální vlivy zemského povrchu, a proto významně přispívá k formování městského klimatu. V rámci přízemní vrstvy se definuje tzv. vrstva městského zápoje (obr. 4c). Jde o objem vzduchu sahající od zemského povrchu do průměrné výšky budov, který je uzavřen a je bezprostředně ovlivňován městskou zástavbou tvořenou zpravidla umělými povrchy. Na základě vlastností umělých povrchů v jednotlivých uličních kaňonech definujeme tzv. městské mikroklima (Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).



**Obr. 4** Měřítko městského klimatu (Oke, 1997).

#### 4.1 Příčiny vzniku tepelného ostrova

Tepelné ostrovy se tvoří ve městech a v předměstských oblastech, protože většina stavebního materiálu absorbuje a zadržuje více slunečního záření a tepla než přírodní materiály v méně osídlených oblastech.

Většina městských stavebních materiálů je vodě nepropustná, takže se dešťová voda nevsakuje do země v místě dopadu. Rozhodujícím faktorem pro formování městského klimatu je však ve většině případů charakter aktivního povrchu (Oke 1997). Umělé povrchy se vyznačují vyšší tepelnou jímavostí, která vyjadřuje schopnost prostupu tepla látkou. Tato charakteristika nabývá u typických povrchů v zástavbě zhruba dvakrát větších hodnot než u povrchů přirozených (Dobrovolný, 2008). Z radiačních vlastností je pro utváření městského klimatu důležité především albedo, které je pro zastavěné oblasti v průměru o 10–15 % nižší než albedo přirozených povrchů viz tab. 3. Albedo je míra odrazivosti tělesa nebo jeho povrchu. Jde o poměr odraženého elektromagnetického záření ku množství dopadajícího záření. Albedo značí, že větší část dopadajícího slunečního záření je umělými povrchy ve městě absorbována a následně uvolňována ve formě tepla. V tabulce jsou také shrnuty hodnoty emisivity. Emisivita (koeficient vyzařování) je bezrozměrné číslo, které vyjadřuje schopnost povrchu emitovat dlouhovlnné záření a je důležitou vlastností pro odhad povrchové teploty z termálních snímků (Dobrovolný, 2008).

**Tab. 3** Hodnoty albeda ( $\alpha$ ) a emisivity ( $\epsilon$ ) pro vybrané druhy urbánních a přirozených povrchů (Dobrovolný, 2008).

<b>Materiál</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Asfalt	0,05–0,20	0,95
Beton	0,30	0,91
Červená cihla	0,30	0,91
Bílá omítka	0,93	0,91
Tráva (dlouhá – krátká)	0,16–0,26	0,90–0,95
Půda (vlhká – suchá)	0,05–0,40	0,98–0,90
Listnatý les	0,15–0,25	0,97–0,99
Jehličnatý les	0,15–0,25	0,97–0,99

V důsledku většího využití tmavých materiálů s nižším albedem a větší tepelnou jímavostí, absenci vlhkosti a prostorové konfiguraci budov a ulic dokáže městské prostředí pojmout více sluneční energie ve formě tepla než přírodní materiály. Gartland (2008) uvádí, že maximální teploty tmavých a suchých povrchů (např. střešní



krytina šindel) mohou během letního horkého dne na přímém slunci dosáhnout teploty až 88 °C, zatímco vegetační povrchy s vlhkou půdou dosahují za stejných podmínek pouze 18 °C. Antropogenní teplo, menší rychlost větru a znečištění vzduchu v městských oblastech také velmi výrazně přispívají k utváření tepelných ostrovů (Gartland, 2008).

K utváření uvedených vrstev a specifického klimatu měst přispívají podle Okeho (1981) tyto faktory:

1. Tepelné a radiační vlastnosti aktivních povrchů rozhodující pro intenzitu pohlcování a odrazu krátkovlnného elektromagnetického záření a emitování záření dlouhovlnného.
2. Nepropustný charakter aktivních povrchů formující zvýšený odtok srážek a snížení výparu a vlhkosti vzduchu.
3. Geometrické upořádání aktivních povrchů, které zvyšuje jejich celkovou plochu, přispívá k značnému podílu ploch s vertikální orientací, k vytváření tzv. uličních kaňonů a k vysoké drsnosti.
4. Znečištění atmosféry související s výskytem polutantů v ovzduší a zvýšeným výskytem kondenzačních jader.
5. Produkce odpadního tepla.

## **4.2 Typy městského tepelného ostrova**

Tepelný ostrov lze rozdělit na několik typů podle mechanismu, jakým se tepelný ostrov města formuje, a prostředí, ve kterém jej lze identifikovat na tzv. atmosférický tepelný ostrov (Atmospheric Urban Heat Island – AUHI) a povrchový či pozemní tepelný ostrov (Surface Urban Heat Island – SUHI) (Oke, 1987).

### **4.2.1 Atmosférický tepelný ostrov (AUHI)**

Podle Akbariho (2008) je pro tento typ tepelného ostrova charakteristická relativně zvýšená teplota vzduchu v městských oblastech ve srovnání s teplotou vzduchu v okolním prostředí. Tepelné vlastnosti aktivních povrchů přímo ovlivňují teplotní poměry přízemní i mezní vrstvy atmosféry. Největší intenzita AUHI se obvykle vyskytuje ve středu města z důvodu nízké koncentrace zeleně a propustných povrchů.

AUHI je možné identifikovat měřením teploty vzduchu na standartních meteorologických stanicích. K měření lze využít také speciální síť účelových měřících stanic nebo mobilní měřicí jízdy. AUHI lze dále dělit na tepelný ostrov mezní vrstvy atmosféry a tepelný ostrov městského zápoje viz obr. 4c (Dobrovolný, 2008).

#### 4.2.2 Povrchový tepelný ostrov (SUHI)

SUHI se narozdíl od předchozího typu netýká teploty vzduchu, ale teploty přirozených i umělých povrchů (LST – Land Surface Temperature). Dobrovolný (2008) definuje SUHI jako kladnou teplotní anomálii aktivních povrchů v prostoru městské zástavby vůči přirozeným povrchům venkovské krajiny. Na základě radičních a tepelných vlastností mají různé povrchy odlišnou povrchovou teplotu. SUHI dosahuje maximální intenzity v denních hodinách během letních měsíců a obvykle existuje i během noci, zatímco AUHI dosahuje maximální intenzity po západu slunce. Vegetace má zpravidla nižší LST než zastavěná plocha.

Pro analýzu teploty jednotlivých povrchů lze využít snímky pořízené termální kamerou. Velmi vhodným zdrojem informací o teplotě aktivních povrchů LST v měřítku celého města mohou být družicová měření. K charakterizování povrchového tepelného ostrova města je možné využít množství emitovaného záření v termální části elektromagnetického spektra (nejčastěji vymezené rozsahem vlnových délek 8–12 $\mu$ m) (Dobrovolný, 2018). Teplotní poměry je možné v případě využití družicových měření charakterizovat právě pomocí LST.

### 4.3 Společné vlastnosti tepelných ostrovů

Podle Lisy Gartland (2008) tepelné ostrovy vykazují pět společných vlastností:

1. **Vyšší teploty vzduchu (AUHI).** Ve srovnání s venkovským, nezastavěným územím je tepelný ostrov obecně teplejší. Tepelné ostrovy jsou často nejteplejším v poměru k venkovskému prostředí poté, co slunce zapadne a nejchladnější po východu slunce. Městský vzduch může za příznivých podmínek pod korunami stromů a kolem budov v „přízemní“ vrstvě dosahovat až o 6 °C vyšší teploty než v běžných venkovských oblastech.
2. **Vyšší teploty povrchu (SUHI).** Vyšší teplota vzduchu je způsobena intenzivnějším ohřevem městských povrchů, protože většina povrchů vytvořených člověkem absorbuje více slunečního tepla než okolní přirozená vegetace.

3. **Větší účinky za jasného a klidného počasí.** Oblasti s nejmenší vegetací a největší zástavbou bývají nejteplejší a tyto účinky se zvyšují za jasného a klidného (bezvětrného) počasí.
4. **Rozšiřující se zástavba.** Jak se města v průběhu času rozšiřují, tepelný ostrov má tendenci expandovat a být intenzivnější. Noční teploty naměřené ve velkých městech se zvyšují. To dokazuje, že města přes den ukládají a v noci uvolňují více tepla, čímž se v průběhu let intenzita tepelného ostrova zvyšuje.
5. **Teplotní inverze.** Tepelné ostrovy vykazují teplejší vzduch v takzvané mezní vrstvě. Intenzivnější výstupy teplého vzduchu způsobují častější výskyt teplotní inverze (situace, kde je vrstva teplejšího vzduchu nad chladnějším vzduchem) jak nad městy, tak za jejich hranicemi po směru proudění větru.

#### 4.4 Dopady

U měst nacházejících se v chladnějším klimatických oblastech nebo ve vyšších nadmořských výškách může být vznik městského tepelného ostrova v zimních měsících považován za prospěšný z důvodu zvýšení teploty vzduchu. Obecně je ale vznik tepelného ostrova vnímán ve většině měst po celém světě jako negativní jev.

Existence tepelného ostrova města má nepříznivý vliv na jeho obyvatele hned z několika důvodů. Zvýšená tepelná zátěž během letních dnů představuje zdravotní rizika zejména pro děti a starší osoby (Tan et al., 2009). Vyšší letní teploty způsobují zvýšené nároky na klimatizování budov a tím pádem zvyšují životní náklady obyvatel z důvodu spotřeby energií. Výsledná poptávka po energii může přetížít systémy, což vede ojedinelé k výpadkům proudu (Gartland, 2008).

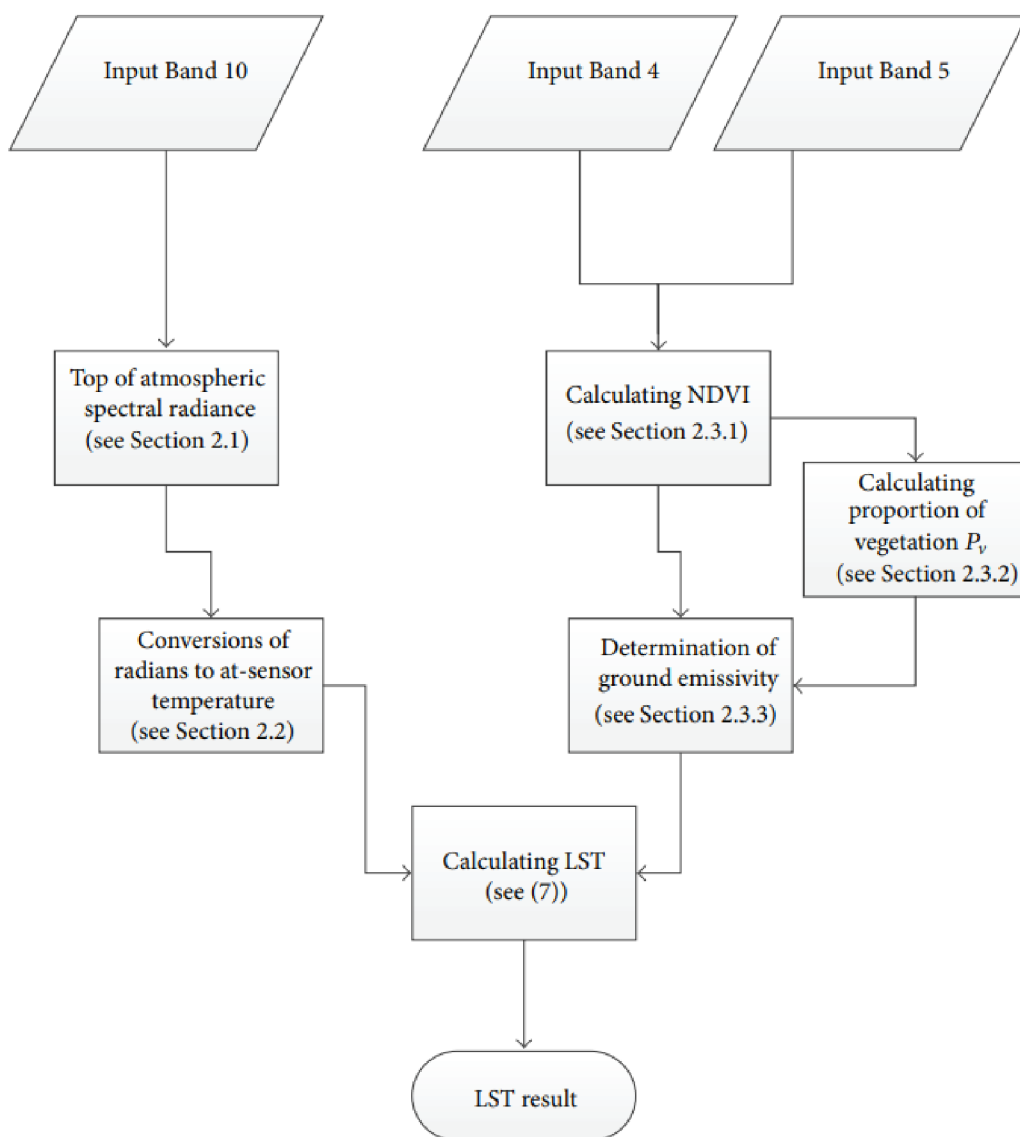
Zvýšené teploty mohou také přímo souviset se zvýšeným znečištěním městského ovzduší, např. díky zvýšené tvorbě přízemního ozonu v letních měsících. Obecně platí, že koncentrace přízemního ozonu narůstají se vzrůstající teplotou. Přízemní ozon, který souvisí s dopady tepelného ostrova města, může způsobovat výrazné zdravotní problémy. Mezi nejčastější patří trvalé poškození plic, bronchitida, srdeční onemocnění, emfyzém, astma a dráždivé účinky na oční spojivky (Gartland, 2008). Vysoké koncentrace přízemního ozonu mohou být důvodem k vyhlášení tzv. „letní smogové situace“.

## 5 Teplota zemského povrchu (LST)

Družicové snímky představují užitečný nástroj pro studium klimatu města. Množství emitovaného záření v termální části elektromagnetického spektra družicových snímků lze využít jako informaci o teplotních poměrech studovaného území.

### 5.1 Princip výpočtu teploty zemského povrchu (LST)

V této kapitole jsou popsány základní principy výpočtu teploty zemského povrchu na příkladu družice Landsat 8. V postupu jsou použita spektrální pásma 4, 5 a 10. Postup je popsán za pomoci schématu z publikace Avdan a Jovanovska (2016) znázorněného na obr. 5.



**Obr. 5** Schéma postupu výpočtu LST (Avdan a Jovanovska, 2016).

### 5.1.1 Výpočet spektrální záře na horní části atmosféry

V prvním kroku výpočtu LST je třeba družicí zaznamenané hodnoty, tzv. DN hodnoty (digital number), převést na hodnoty spektrální hustoty záře na horní hranici atmosféry TOA (Top of Atmosphere radiance). DN je bezrozměrná veličina, popisující surová data dopadající na senzor v termálním pásmu (spektrálním pásmu 10 u Landsatu 8). Tyto hodnoty jsou zatíženy chybami vzniklými v průběhu měření, které je třeba pomocí atmosférické a radiometrické korekce a radiometrické kalibrace převést na veličinu spektrální hustoty záření (Shetty et al., 2021).

### 5.1.2 Převod spektrální záře na horní hranici atmosféry na teplotu jasu

Při kontaktu záření s atmosférou propouští atmosféra pouze část záření dopadající na zemský povrch. Proto je hodnoty TOA potřeba ošetřit o vliv atmosféry pro stanovení tzv. teploty jasu (BT). Teplota jasu odpovídá teplotě absolutně černého tělesa, které by vyzařovalo stejné množství záření jako těleso ve specifikovaném spektrálním pásmu. Jinými slovy by odpovídala teplotě povrchu, pokud by splňoval definici absolutně černého tělesa. K výpočtu BT jsou hodnoty TOA ošetřeny o vliv atmosféry pomocí kalibračních tepelných konstant, které jsou specifické pro daný senzor a spektrální pásmo.

### 5.1.3 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a vegetační poměr

Pro stanovení skutečné hodnoty LST jednotlivých povrchů je zapotřebí znát emisivitu, která se určuje na základě podílu vegetace pomocí NDVI indexu. NDVI index představuje číselný ukazatel, který se používá v aplikacích dálkového průzkumu Země za účelem identifikace povrchového vegetačního pokryvu na satelitních snímcích. Pro získání hodnoty NDVI se používá červené (RED – 4 u Landsat 8) a blízké infračervené (NIR – 5) spektrální pásmo.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Výsledky výpočtu NDVI vždy udávají hodnoty v rozmezí –1 až 1. Nejblíže hodnoty k číslu jedna představují nejvyšší hustotu zelené vegetace, hodnoty blízké nule znamenají oblasti bez výskytu vegetace.

Tab. 4 ukazuje hodnoty NDVI indexu pro různé druhy povrchů.

**Tab. 4** Hodnoty NDVI pro různé druhy povrchů (Dobrovolný, 1998).

<b>Povrch</b>	<b>NDVI</b>
Velmi hustá vegetace	0,500
Středně hustá vegetace	0,140
Řídká vegetace	0,090
Holá půda	0,025
Oblačnost	0,002
Sníh a led	-0,046
Voda	-0,257

Na základě hodnot získaných z NDVI indexu lze určit vegetační poměr ( $P_v$ ), který je chápán jako poměr vegetačního krytu ve svislém směru na celkové vegetační ploše (Deardorff, 1978). Narozdíl od NDVI indexu se vegetační poměr využívá v globálních podmínkách, což ukazuje na jeho vhodnější využití pro výpočet emisivity z družicových dat. Z vegetačního poměru  $P_v$  lze následně určit celkovou emisivitu povrchu.

#### 5.1.4 Závěrečný výpočet LST

V posledním kroku jsou získané hodnoty přepočteny na LST aplikací Planckova a Boltzmannova zákona (Avdan a Jovanovska, 2016).

$$T_s = \frac{BT}{\{1 + [(\lambda BT/\rho)\ln \varepsilon_\lambda]\}}$$

$T_s$  je povrchová teplota země ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $BT$  je teplota jasu ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda$  je vlnová délka vyzařovaného záření a  $\varepsilon_\lambda$  je hodnota emisivity.

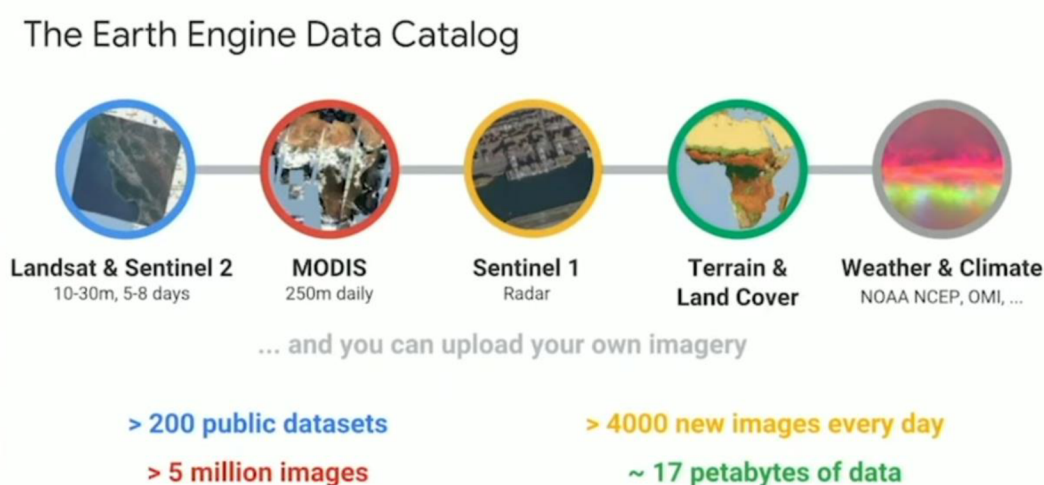
$$\rho = h \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$$

$\sigma$  je Boltzmannova konstanta,  $h$  je Planckova konstanta a  $c$  je rychlost světla.

## 6 Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) je webový portál poskytující globální archiv volně dostupných satelitních dat z civilních systémů využitelných ve vědách o Zemi za posledních více než 40 let satelitního pozorování. Tento archiv zahrnuje satelitní snímky z civilních satelitních systémů, jako jsou např. Landsat, MODIS, Sentinel. Prostřednictvím High Performance Computing (HPC) umožňuje vědcům snadný a rychlý přístup k těmto datům a jejich využití v úlohách DPZ vyžadující velké výpočetní kapacity.

GEE katalog s daty je poměrně rozsáhlý a stále roste. Na většině lokalit se data aktualizují ve dvoutýdenním intervalu, u některých míst probíhá aktualizace denně či vícekrát za den. Dostupná data pocházejí z více satelitů, včetně z programu Sentinel 1, 2 a 3, Landsat Series, nebo Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) viz obr. 6, které jsou vhodné pro zkoumání povrchové teploty země (LST). Dále se v katalogu nachází např. data ze družic National Oceanic and Atmospheric Administration (Národní úřad pro oceán a atmosféru v USA), který využívá pokročilý radiometr s velmi vysokým rozlišením (AVHRR) pro zkoumání stavu vegetace, Advanced Land Observing Satellite (ALOS) pro zkoumání a mnoho dalších meteorologických družic (Goerlick et al. 2017). Platforma navíc poskytuje uživateli možnost nahrávat vlastní snímky se kterými může v GEE pracovat. Dostupné soubory dat pokrývají širokou škálu vědeckých oblastí, zahrnující studium atmosférických a geofyzikálních jevů, nebo v našem případě studium zemského povrchu na základě tepelných a energetických vlastností.

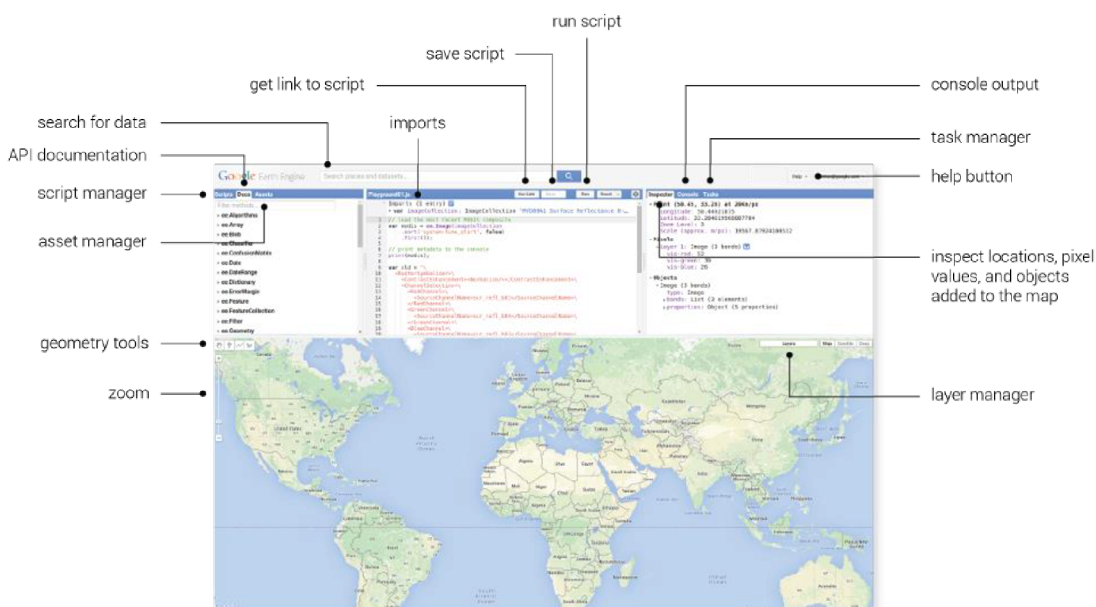


**Obr. 6** Katalog používaný v platformě GEE (GEE, 2022).

Hlavní výhodou aplikace GEE oproti tradičním způsobům analýzy satelitních snímků je možnost využití online pracovního prostředí, včetně cloudového úložiště a výpočetní kapacity vzdálených serverů společnosti Google LLC. To umožňuje práci s databází i jednotlivcům či institucím, které nedisponují kvalitním hardwarovým vybavením. Ke kvalitnímu výsledku postačí dostatečné internetové připojení, společně se znalostí programovacích jazyků JavaScript, Python nebo REST, pomocí kterých program umožňuje uživateli programovat v okně skriptového editoru (**obr. 7**). V tomto editoru si může uživatel vytvořit vlastní úlohu za využití celé škály data setů a přednastavených funkcí, jak od vývojářů Google, tak i samotných uživatelů tohoto prostředí.

## 6.1 Popis práce s editorem GEE

Pro práci s editorem v GEE je vyžadováno přihlášení pomocí účtu Google. Funkce jsou navrženy tak, aby práce s editorem byla rychlá a snadná. Editor využívá webového prohlížeče, který zahrnuje tři pracovní okna, přičemž každé z nich je koncipováno pro jiný účel. Pod těmito okny je umístěno mapové prostředí, které zabírá přibližně dvě třetiny prohlížeče. Slouží především jako podklad pro vykreslování obrazových výstupů z algoritmu. K tomu lze použít funkci „Layers“, která umožňuje upravovat jednotlivé vrstvy. V horní části mapového prostředí naleznete základní ovládací prvky jako geometrické nástroje, nástroj přiblížení mapy (zoom) a organizátor vrstev.



**Obr. 7** Editor GEE.



Nad pracovními okny se nachází vyhledávací pole a tlačítko nápovědy. První okno, ležící v levém horním rohu prohlížeče, zahrnuje tři záložky. V první záložce s názvem „Scripts“ se ukrývají již existující algoritmy, které jsou vytvořeny vývojáři Googlu a sdílené ostatními uživateli, kteří poskytli souhlas ke zveřejnění jejich prací. Tyto uložené algoritmy lze použít jako podklad své práce nebo je případně použít do vlastního algoritmu. Pokud by si někdo chtěl vytvořit vlastní skript, je zapotřebí vytvořit složku v cloudovém úložišti Googlu, kam se algoritmy ukládají. Klepnutím na tlačítko „New“ v této záložce vytvoříte buď nové úložiště, nebo novou složku se soubory v úložišti. Skripty je možné pomocí dalších ikon v záložce přejmenovat nebo odstranit. Stejně tak lze skripty přesouvat a organizovat je do složek. Všechny skripty i úložiště zachovávají historii jejich verzí, tudíž je potom možné je porovnávat, případně se i vrátit ke starší verzi. První záložka, stejně jako ta následující, obsahuje vyhledávací řádek pro usnadnění hledání. Druhá záložka prvního okna nese název „Docs“. V této sekci lze vyhledávat a procházet kompletní dokumentaci JavaScript API. Poslední ze záložek prvního okna se nazývá „Assets“. Pomocí této záložky lze nahrávat a následně spravovat geoprostorová data. Vaše data jsou soukromá, avšak je možné je později sdílet. Jsou zde též uloženy všechny informace o importovaných datech včetně náhledu miniatury, seznamu vlastností, tlačítek pro import, sdílení nebo odstranění vaší práce.

Prostřední okno, tvořeno pouze jedinou záložkou, je nejdůležitějším prvkem pro samotnou tvorbu nového algoritmu. Zde se nachází všechna importovaná data, a proto také okno nese název „Imports“. Nachází se zde tlačítko pro možnost uložení, jenž nabízí možnost uložit provedené změny, funkci „uložit jako“ a možnost uložit skript s popisky. Vedle se pak nachází tlačítko pro spuštění algoritmu a vymazání pracovní plochy. Zbývající dvě ikonky umožňují vytvoření a export nového algoritmu a nastavení funkcí skriptového pole. K tvorbě algoritmu je využíván programovací jazyk JavaScript, alternativou pak může být programovací jazyk Python, který je nutný nejprve nainstalovat.

Vpravo nahoře se nachází třetí okno a má fungovat jako správce zpracování. V tomto okně jsou opět tři záložky a stejně jako tomu bylo u okna prvního, každá z nich má svou funkci. První záložka s názvem „Inspector“ informuje o umístění na mapě, hodnotách pixelů a objektech, které byly do mapy přidány. V praxi to znamená, že je-li aktivovaná karta „Inspector“, po kliknutí na mapu se zobrazí umístění a hodnoty vrstvy pod kurzorem. Druhá záložka „Console“ zobrazuje informace o

jednotlivých datech vstupujících do algoritmu a vykresluje funkce zadané ze skriptu. Poslední záložka „Tasks“ zobrazuje odeslané úlohy/úkoly, jejichž dokončení zabere více času, než je standardní časový limit požadavku API. Tyto dlouhotrvající úlohy pak vytvářejí trvalé artefakty v Earth Engine, které spadají do dvou kategorií, Import a Export. Import se používá pro nahrání obrázků či tabulek z různých typů souborů. Exportní úkoly jsou užívány k provádění uložení výsledků z výpočetního systému Earth Engine do složky. Vyexportované výsledky (např. v podobě rastru TIFF) lze následně upravovat v externích aplikacích GIS.

## 6.2 Bibliografická analýza využití GEE v odborných článcích

V posledních letech narůstá celosvětově využití GEE ve vědeckých úlohách. To dokazuje například přehledový článek autorů Kamara a Mutangy (2017).

Na základě systematického vyhledávání výrazů „Google Earth Engine“ a „GEE“ v bibliografických aplikacích Google Scholar a Web of Science našli autoři mezi lednem 2010 a červnem 2017 300 studií publikovaných v mezinárodních odborných recenzovaných časopisech, využívající GEE pro vědecké účely. Úplně první zaznamenaný příspěvek představující aplikaci GEE byl ve formě konferenčního příspěvku na konci roku 2011 (Moore a Hansen, 2011). Příspěvek se zabýval představením aplikace, dostupnými daty, možnostmi využití a potenciálem do budoucna. Články představující aplikaci GEE se začaly publikovat na konci roku 2011 a během roku 2012. Výrazný nárůst vědeckých publikací během minulé dekády naznačuje tab. 5. Na konci sledovaného období již bylo publikováno více než 100 odborných publikací ročně (Kumar a Mutanga, 2018).

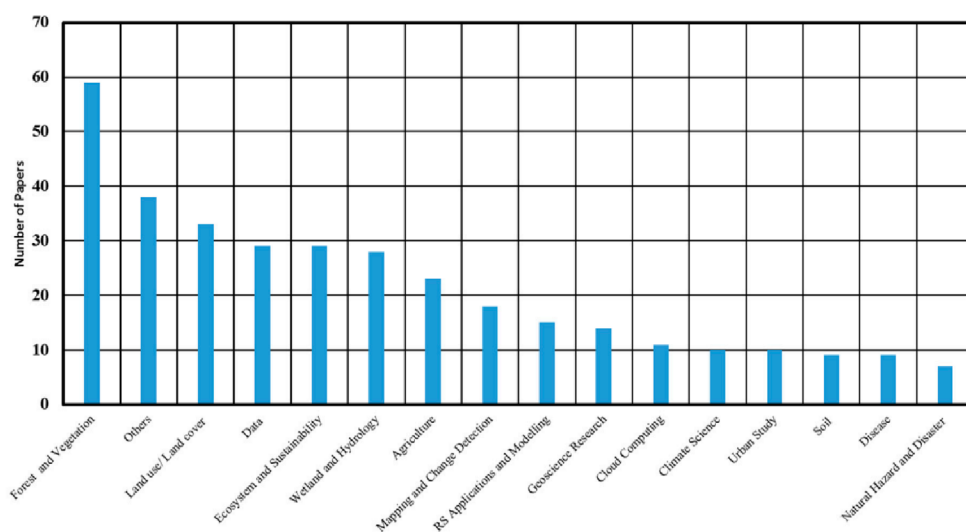
**Tab. 5** Počet publikací využívajících platformu GEE publikovaných každý rok od počátku GEE do roku 2017. Údaje za rok 2017 jsou pouze do 30. června (Kumar a Mutanga, 2018).

Rok	Počet nalezených publikací
2011	9
2012	10
2013	10
2014	25
2015	47
2016	109
2017	90

Z hlediska geografického rozložení příspěvků převažovaly studie z USA (60), následované články od autorů z Číny (24), Brazílie (19), Indie (15), Indonésie (15), Austrálie (14) a Kanady (11). V celé Evropě bylo za sledované období publikováno 45 studií, z toho nejvíce v Itálii (7), Německu (5) a Spojeném království (4). Nedostatek studií byl pozorován v zemích Středního východu a zejména v Africe, kde bylo publikováno pouze 7 studií. Autoři uvádí jednu studii publikovanou v České republice, ale bohužel se mi ji nepodařilo dohledat. Mimo tuto studii nebyl v České

republike doposud publikován žádný odborný článek popisující využití aplikace GEE pro DPZ.

Existuje široká škála oblastí využití GEE od zemědělství, lesnictví, ekologie, ekonomie a zdravotnictví. Kumar a Mutanga rozdělily články do 16 kategorií, jak je uvedeno na obr. 8. Nejvyšší počet studií spadal do kategorie les a vegetace (17 %), následován studii týkající se využití půdy a krajinného pokryvu, studia ekosystémů a jejich udržitelnosti, a hydrologických aplikací, které měly shodně 10 %. Další kategorie se týkaly manipulace s daty (8 %), zemědělství (7 %), mapování a detekce změn v krajině (5 %). Studie na vývoj metod a aplikací pro DPZ se vyskytovaly ve 4 % publikací, kategorie „cloud computing“, využití půdy, výskyt nemocí, klimatická věda a městská studia shodně ve 3 % studií. Studia přírodních katastrof měly jako poslední kategorie 2 %. Do kategorie nemoci primárně spadají studie monitorující výskyt malárie na africkém kontinentě. Navíc 11 % z aplikovaných studií byly zařazeny do kategorie „ostatní“, protože jejich počet byl příliš malý na to, aby jim byla vytvořena vlastní kategorie. Jednalo se o aplikace v oblastech jako je ekonomika, znečištění ovzduší nebo archeologie.



**Obr. 8** Široká kategorizace aplikačních oborů GEE napříč 300 studii v průzkumu (Kumar a Mutanga, 2018).

### **6.3 Možnosti využití GEE ve studiu změn prostorového rozložení povrchové teploty**

Jak naznačuje přehledová studie Kumara a Mutangy (2018), platforma GEE disponuje širokou škálou možností využití. Zmínění autoři nicméně našli pouze pět publikací označených jako „urban studies“. Z přehledového článku bohužel nelze konkrétní citace těchto pěti studií dohledat. Za účelem ověření údajů od Kumara a Mutangy (2018) a aktualizace jejich vyhledávání do současnosti jsem vypracoval vlastní přehled odborných studií využívající aplikaci GEE a zabývající se časoprostorovými změnami v rozložení povrchové teploty v městském prostředí.

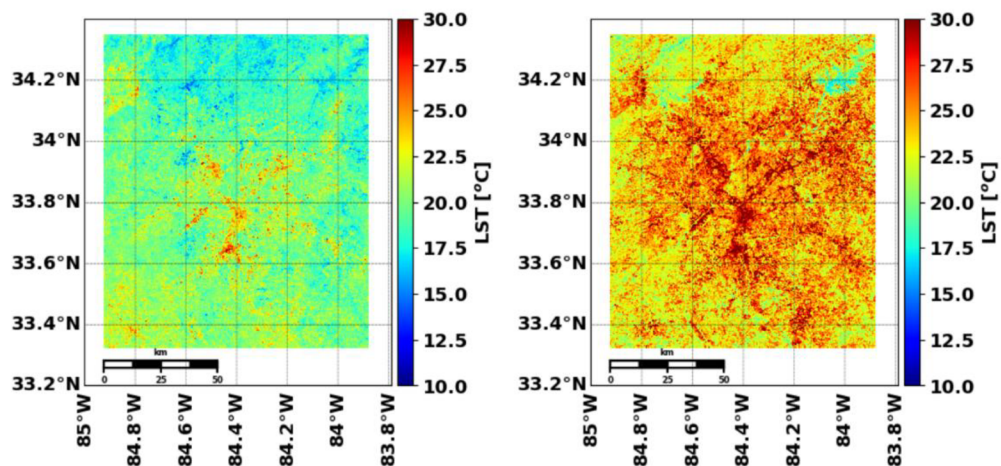
Na základě vyhledávání výrazů „Google Earth Engine in urban studies“ a „GEE in urban studies“ v bibliografické aplikaci Google Scholar jsem našel 16 odborných studií zabývajících přímo klimatem měst. Studie byly publikovány od roku 2015, avšak polovina článků byla publikováno v letech 2020 a 2021. To značí trend přibývajících studií, zabývajících se městským klimatem a využíváním aplikace GEE. Z nalezených studií bylo 10 publikováno v Číně, a 3 v Indii. Jednu publikovanou studii evidujeme v USA, Itálii a Íránu.

Z nalezených článků jsem vybral pět studií, které názorně demonstrují možnosti směřování dalšího výzkumu klimatu měst (nejen) v České republice.

Všech pět studií využilo GEE jako platformu pro okamžité, rychlé a bezplatné získání dat. Konkrétně se jedná o data z programů Landsat, MODIS nebo Sentinel.

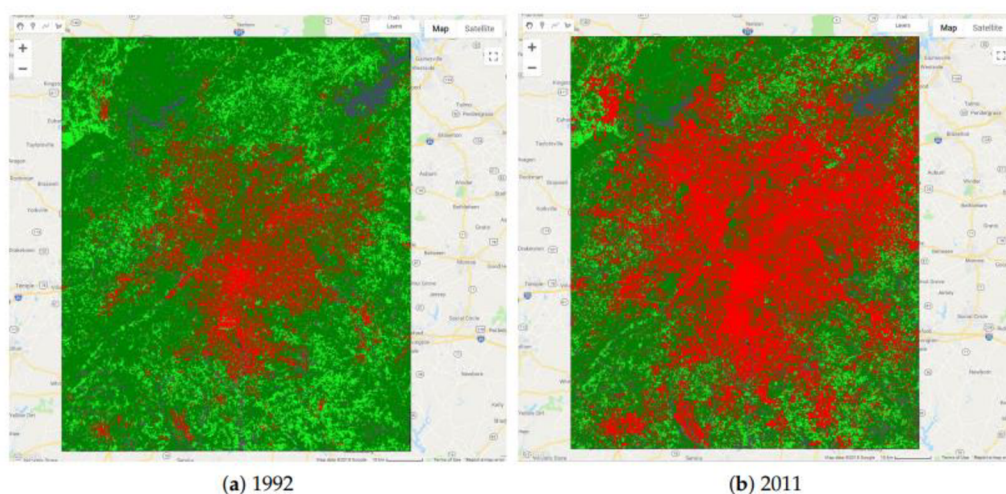
#### **6.3.1 Vliv rostoucí zástavby na zvyšující se LST**

Studie Ravanelli et al. (2018) zkoumala vliv rostoucí zástavby na zvyšující se teplotu zemského povrchu v šesti rostoucích amerických městech. Ravanelli et al. uvádí, že získali prostřednictvím GEE více než šest tisíc snímků ze satelitů Landsat, které byly za pomoci Climate Engine (bezplatná webová aplikace využívající GEE, kterou lze použít k vytváření map, grafů atd.) použity k vypočtení ročního mediánu teploty zemského povrchu pro každý rok v období 1992 až 2011. Pro každou zkoumanou oblast bylo tudíž získáno 20 termálních snímků. Obr. 9 ukazuje medián rozložení povrchové teploty v Atlantě v letech 1994 a 2010, které byly autory v tomto městě vybrány jako nejvhodnější pro studium dlouhodobých změn. Jednoduché srovnání těchto dvou snímků ukazuje globální nárůst teploty zemského povrchu.



**Obr. 9** Mapy ročního mediánu teplot zemského povrchu v Atlantě pro roky 1994 (vlevo) a 2010 (vpravo), vypočtené pomocí CE ze všech snímků Landsat získaných z GEE (Ravanelli et al., 2018).

Cílem autorů bylo kvantifikovat vliv rostoucí zástavby na změny povrchové teploty měst. Obr. 10, znázorňuje změnu v krajinném pokryvu v Atlantě mezi roky 1992 a 2011.



**Obr. 10** Situace krajinného pokryvu v Atlantě v roce 1992 (a) a v roce 2011 (b). Červená barva znázorňuje urbanizované území, zelená barva kultivované území, tmavě zelená barva lesy/křovinné porosty (Ravanelli et al., 2018).

Za účelem kvantifikace vlivu urbanizace na nárůst povrchové teploty ve sledovaném období bylo třeba hodnoty ošetřit o vliv globálního trendu povrchové teploty pomocí metod lineární regrese. Po ošetření tohoto vlivu dospěli autoři k výsledku, že urbanizace významně ovlivňuje intenzitu povrchového tepelného ostrova ve

studovaných městech. Konkrétně výsledky případové studie v Atlantě ukázaly, že z celkového nárůstu povrchové teploty mezi roky 1992 a 2010 o 0,29–0,37 °C/rok způsobil proces urbanizace nárůst povrchové teploty až o 0,12 °C/rok.

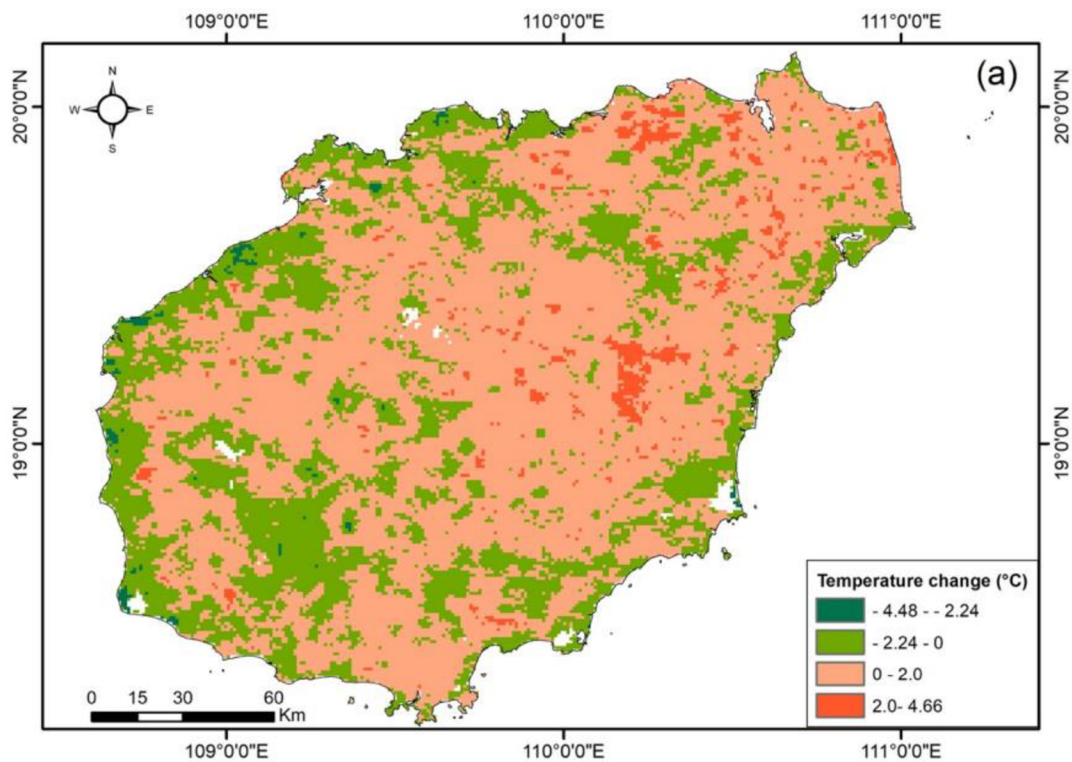
### **6.3.2 Souvislost mezi lidskou modifikací zemského povrchu a změnami LST**

Souvislostí mezi antropogenní přeměnou zemského povrchu a změnami povrchové teploty se zabývala také studie Chu et al., (2020) v ostrovní provincii Chajnan v Číně za roky 2000–2016. Autoři v tomto případě využili datovou sadu MODIS Land Surface Temperature a Global Human Modification, která ukazuje změny povrchu způsobené lidskou činností. Obě sady jsou volně dostupné v katalogu GEE. Na rozdíl od družic Landsat jsou snímky ze systému MODIS dostupné pro každý den. Nevýhodou je však nižší prostorové rozlišení, které u termálního pásma MODIS činí 1000 m.

Datová sada Global Human Modification (GHM) poskytuje globální změny na zemském povrchu způsobené lidskou činností v prostorovém rozlišení 1000 m. V této datové sadě je globální intenzita modifikace zemského povrchu založena na modelování 13 antropogenních stresorů. Autoři pro svoji studii použily zjednodušený index modifikace zemského povrchu, který se vypočítá z pěti hlavních antropogenních stresorů (hustota osídlení, využití zemědělské půdy, doprava, výroba energie, elektrická infrastruktura).

Hodnoty indexu se pohybují od 0 do 1 podle stupně modifikace krajiny, přičemž hodnota 0 čistě přírodní krajinu a hodnota 1 představuje nejvyšší stupeň modifikace krajiny.

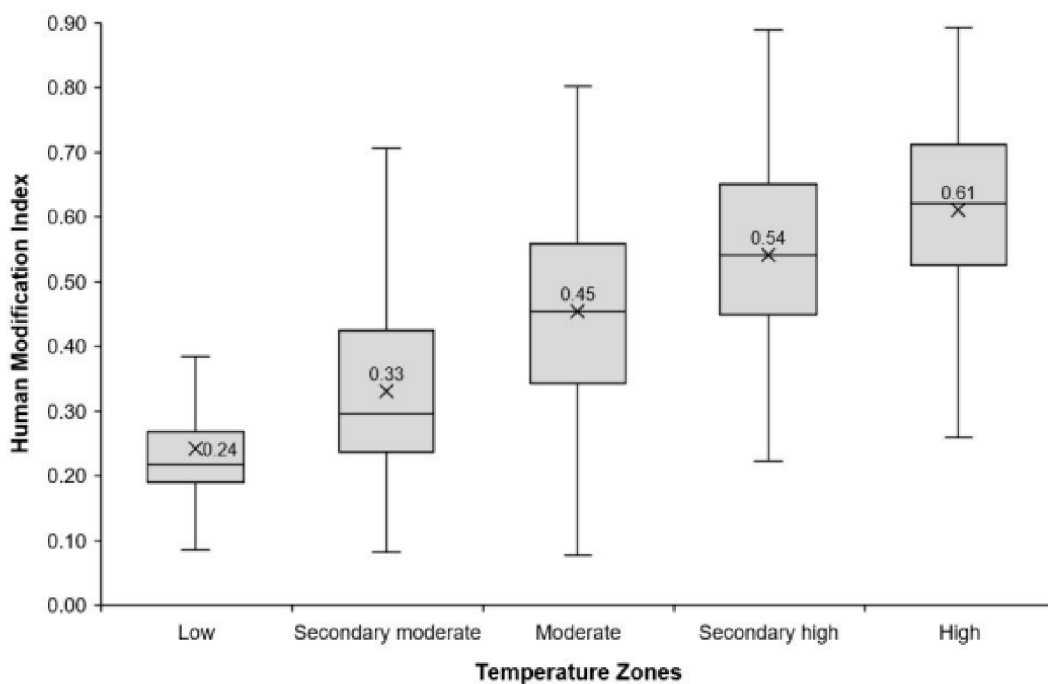
Z výsledku studie vyplývá, že většina oblastí s poklesem průměrné roční teploty zemského povrchu v roce 2016 oproti 2020 se nacházela na pobřeží ostrova, zatímco vnitrozemí ostrova zaznamenalo nárůst LST viz obr. 11.



**Obr. 11** Prostorové rozložení změny roční průměrně teploty na ostrově Chaj–nan mezi roky 2000-2016, zelené oblasti značí snížení teploty, červené oblasti znamenají nárůst teploty povrchů (Chu et al., 2020).

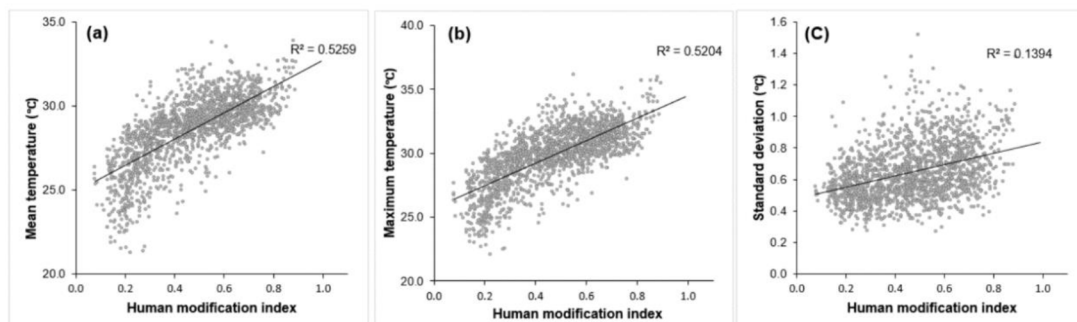


Autoři rozdělili výsledky do pěti teplotních zón od té s nejnižší teplotou po tu s nejvyšší teplotou. Obr. 12 ukazuje rozpětí hodnot indexu modifikace povrchů v pěti teplotních zónách. Z výsledku je patrné, že vyšší míra přeměny přírodních ploch na antropogenní plochy odpovídá v průměru vyšší LST daných ploch.

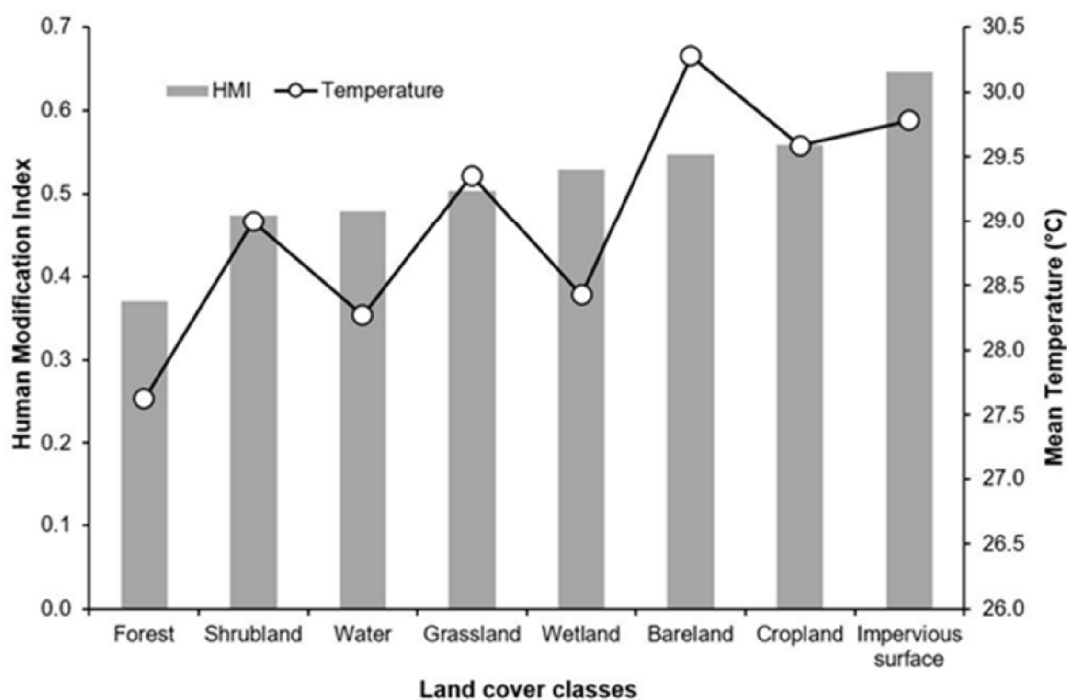


**Obr. 12** Rozložení indexu lidské modifikace v teplotních zónách na ostrově Chaj–nan v roce 2016 (Chu et al., 2020).

Souvislost mezi lidskou modifikací a průměrnou a maximální teplotou dokazují i obrázky 13a a b. Autoři uvádí vysokou míru korelace mezi průměrnou/maximální teplotou a indexem lidské modifikace (shodně 0,72) za 17 let analýzy.



**Obr. 13** Koeficient determinace mezi teplotou průměrnou (a), maximální (b) a standardní odchylkou (c) a indexem lidské modifikace na ostrově Chaj–nan (Chu et al., 2020).



**Obr. 14** Index lidské modifikace a průměrných teplot zemského povrchu na ostrově Chaj–nan podle typu krajinného pokryvu na ostrově (Chu et al., 2020).

Z výsledků vyplývá zřejmá souvislost mezi změnami způsobenými lidskou modifikací a krajinným pokryvem. Nejvyšší průměrnou povrchovou teplotu dosahovaly povrchy s holou (ornou) půdou nepropustnými materiály (přes 30 °C), zatímco zalesněné plochy, které byly v průměru o 2 °C chladnější. Z hlediska indexu lidské modifikace byla zjištěna nejvyšší hodnota u nepropustných povrchů 0,65, zatímco lesní oblasti měly průměrný index lidské modifikace pouze 0,37.

### 6.3.3 Vliv urbanizace na klimatické podmínky

Shetty et al., (2021) zkoumali souvislost urbanizace s klimatickými podmínkami ve městech. V tomto případě si Shetty et al. pro studii zvolili Dakshina Kannada, což je okres nacházející se v jihozápadní části Indie. Ve studii byly použity datové sady Landsat 7 a 8, CHIRPS Daily (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data), která ukazují časovou sérii srážek za posledních 30 let, a Terra Net Evapotranspiration, což je datová sada, která pomocí algoritmu uchovává vlastnosti vegetace, albedo a krajinný pokryv. Data byla extrahována pro roční období před a po monzunové sezóně v letech 2001–2019.

Autoři dospěli k závěru, že ve studované oblasti došlo ve sledovaném období ke snížení podílu lesní plochy o 13,67 % a nárůstu zastavěných ploch o 18,81 %. Z hlediska teploty zemského povrchu byl před monzunovou sezónou zaznamenán v posledních dvou dekádách výrazný nárůst. K největšímu nárůstu LST došlo v zastavěných oblastech (+6,92 °C) a lesních oblastech o (+4,07 °C), následované nárůstem LST ve vodních plochách o 2,07 °C, v zemědělské půdě o 1,73 °C a v holé půdě o 0,91 °C.

Oproti tomu v období po monzunové sezóně byly pozorovány jen minimální změny. Jak Shetty et al. uvádí, průměrná teplota se zvýšila v zastavěných oblastech o 0,83 °C, v lesních oblastech o 0,51 °C, ve vodních plochách o 0,19 °C a v zemědělské půdě o 0,13 °C.

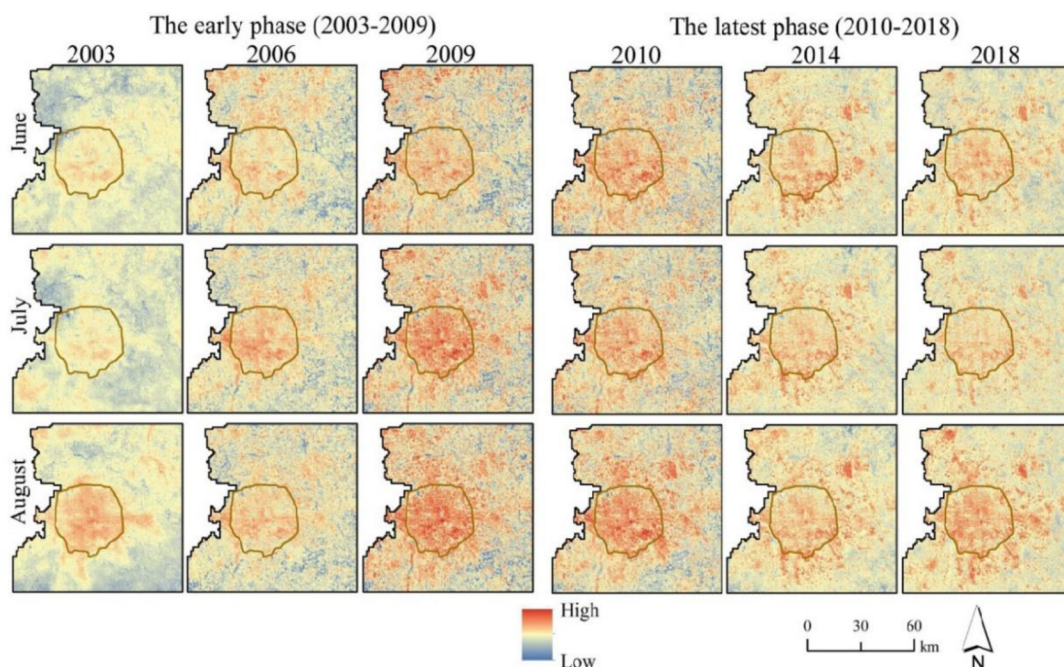
Celkově se ve městských oblastech průměrná povrchová teplota za téměř dvě dekády zvyšovala tempem 0,36 °C/rok/km<sup>2</sup>. Studie jasně dokazuje propojenost povrchové teploty s využíváním půdy (Land use) a krajinným pokryvem (Land Cover). Jak je však patrné, trendy nárůstu povrchové teploty se mohou výrazně lišit v závislosti na ročním období a množství vody v krajině.

### 6.3.4 Časoprostorové vzory chování letního UHI

Liu et al., 2020 zkoumal ve své studii chování městského tepelného ostrova (UHI) v Pekingu v Číně v letech 2003 až 2018. Stejně jako Ravanelli et al. (2018), Shetty et al. (2021) a Chu et al. (2020) byla ve studii použita datová sada ze satelitů Landsat a MODIS zpracována v GEE.

Výsledky ukázaly, že v Pekingu existují dvě fáze dlouhodobých změn UHI. První fáze (2003–2009) se projevila výrazným nárůstem intenzity UHI v městských oblastech. Většina regionů s vysokou teplotou se nacházela v centru města. Nárůst červených oblastí (tj. vysoká intenzita UHI) a pokles modrých oblastí (tj. nízká intenzita UHI) na obr. 15 naznačuje, že celková intenzita UHI od roku 2003 do roku 2009 stoupla. Oblasti s nízkým růstem intenzity UHI se nacházejí hlavně v jihozápadní a jihovýchodní části Pekingu, kde se vyskytuje zejména zemědělská půda, pastviny a vodní plochy.

Ve druhé fázi (2010–2018) se oblasti s vyšší teplotou stále koncentrují v centrální městské části, ale postupně se začínají oteplovat i okolní oblasti. To má za následek, že intenzita UHI městské oblasti časem slábne. Na rozdíl od první fáze celková intenzita UHI městského centra od roku 2010 do roku 2018 klesá, zatímco intenzita UHI v příměstských oblastech ve stejném období roste.

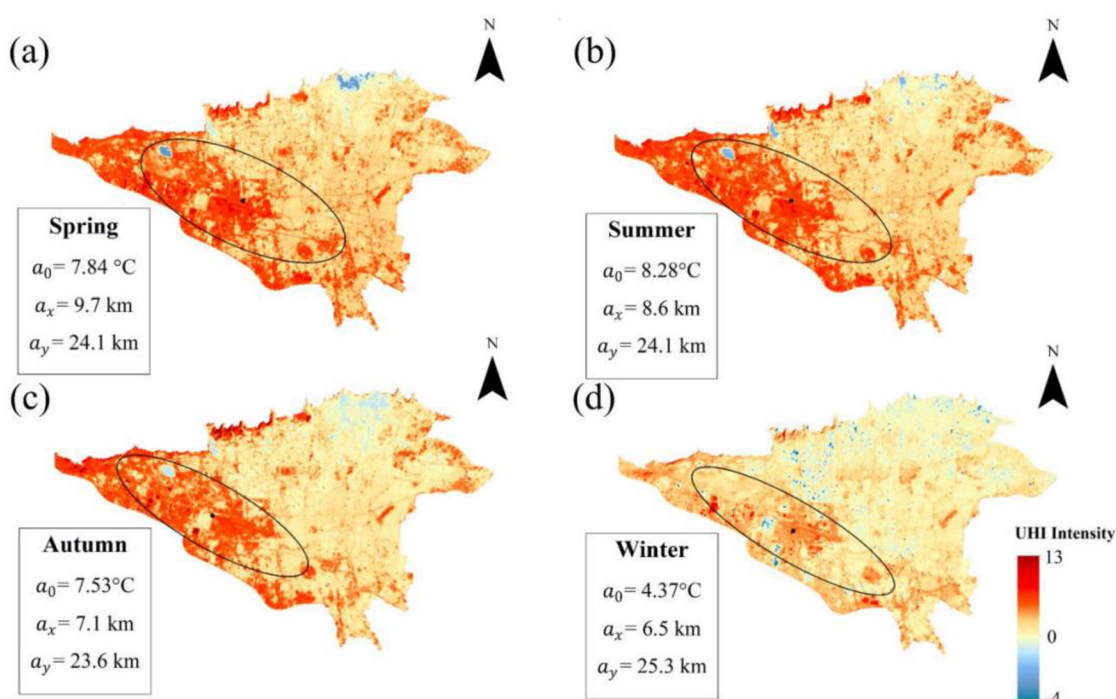


**Obr. 15** Ukazatel průměrné měsíční intenzity UHI v reprezentativních letech (2003, 2006, 2009, 2010, 2014, 2018) v Pekingu za měsíce červen, červenec a srpen (Liu et al., 2020).

### 6.3.5 Povrchová a časová analýza SUHI (povrchového městského tepelného ostrova)

Časoprostorové změny v intenzitě povrchového městského tepelného ostrova (SUHI) monitorovali také Najafzadeh et al., (2021) v hlavním a nejlidnatějším městě Íránu – Teheránu. Autoři využili 68 snímků získaných z družic Landsat 5 a 8 pomocí aplikace GEE v letech 1989–2019. Stejně jako ostatní studie uváděné výše vypočítali hodnoty LST. Dále zkoumali také intenzitu SUHI,

Najafzadeh et al., 2021 uvádí, že celková intenzita SUHI vzrostla v celém městě v posledních třech desetiletích v průměru o 2,02 °C. Nejčastějšími důvody tohoto nepříznivého nárůstu byl úbytek vegetačního krytu o 34,72 % a masivní expanze města o 53,33 %.



**Obr. 16** Ukazatel SUHI v roce 2019 v Teheránu, (a) jaro, b (léto), c (podzim), d (zima),  $a_0$  značí průměrnou intenzitu SUHI oblasti vyznačené elipsou,  $a_x$  a  $a_y$  jsou parametry os elipsy značící prostorový rozsah SUHI (Najafzadeh et al., 2021).

## 6.4 Praktická ukázka výpočtu LST

V této práci je kladen důraz na časoprostorové změny v rozložení povrchové teploty v městském prostředí využívající aplikaci GEE. Proto jsem si jako praktickou ukázkou využití GEE zvolil jednoduchý výpočet prostorového rozložení povrchové teploty za využití dat z družice Landsat 8 v oblasti Prahy (obr. 17). Pro názornou ukázkou snadnosti práce z GEE a základní vizuální porovnání změn prostorového rozložení povrchové teploty v okolí Prahy jsem vytvořil tři mapové výstupy: rozložení průměrné povrchové teploty v Praze a okolí (i) v roce 2013, (ii) v roce 2020 a (iii) za celé období 2013–2020. Rok 2013 jsem zvolil jako rok vypuštění družice Landsat 8 na oběžnou dráhu. Družice byla vypuštěna 11. února. K porovnání jsem zvolil rok 2020 jako poslední rok dekády.

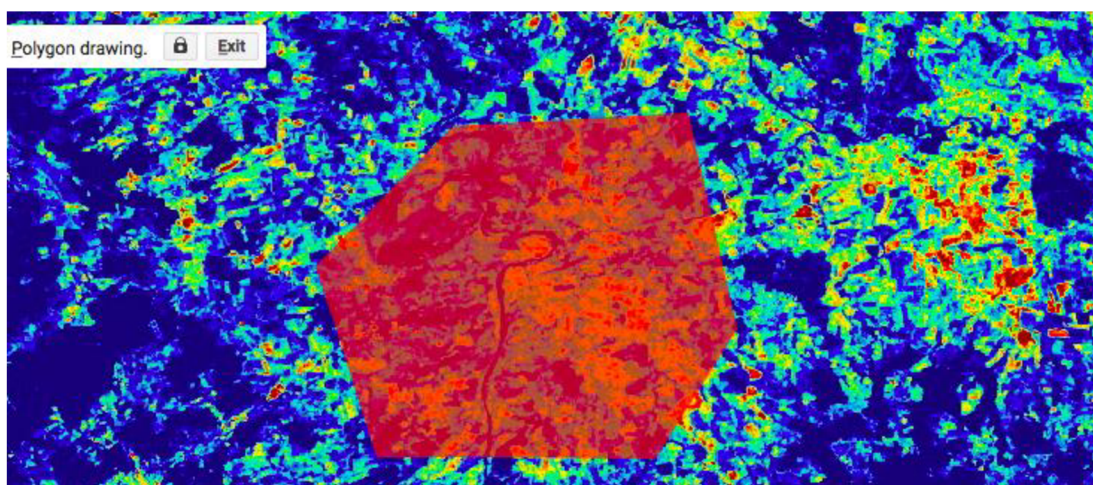
Kód pro výpočet LST, jsem vytvořil na základě nápovědy dostupné přímo v aplikaci GEE a na webovém fóru pro vývojáře v GIS (<https://gis.stackexchange.com/>).



**Obr. 17** Lokality Prahy použité v GEE.

#### 6.4.1 Popis výpočtu a exportu prostorového pole povrchové teploty z GEE

Před samotným výpočtem je potřeba v editoru definovat oblast, pro kterou bude editor zpracovávat satelitní snímky (geometry – červený polygon na obr. 18).



**Obr. 18** Polygon v okolí Prahy znázorňující oblast zpracování satelitních snímků Landsat v editoru GEE.

V dalším kroku bylo nutné nastavit detekování oblačnosti na snímcích tak, aby všechny použité snímky za zvolené období byly bezoblačné, a tudíž bylo možné analyzovat vlastnosti zemského povrchu. Na snímcích s velkým pokrytím oblohy oblačností není zkoumaná lokalita vidět, proto je nutné tyto snímky z výpočtu vynechat (řádky 1–11 na obr. 19). Následně byla v kódu definována použitá spektrální pásma satelitu a jejich nejmenší a nejvyšší hodnota. V tomto konkrétním případě byla zvolena pásma B2 (modré), B3 (zelené) a B4 (červené).

```
1 //cloud mask
2 function maskL8sr(col) {
3   // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
4   var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
5   var cloudsBitMask = (1 << 5);
6   // Get the pixel QA band.
7   var qa = col.select('pixel_qa');
8   // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
9   var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
10              .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
11   return col.updateMask(mask);
12 }
13
14 var vizParams2 = {
15   bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
16   min: 0,
17   max: 3000,
18   gamma: 1.4,
19 };
20
```

**Obr. 19** Nastavení zachytávání oblačnosti na snímcích z Landsatu 8 – editor GEE.

## 6.4.2 Načtení kolekce Landsat 8 a popis výpočtu NDVI indexu

Po vrstvách vymezující geometrii a detekování oblačnosti bylo potřebné specifikovat datovou sadu, ze které budou čerpány snímky. V našem případě se jednalo o datovou sadu Landsat 8. V GEE je tato datová sada kódově označena *LANDSAT/LC08/C01/T1\_SR* a byla nahrána pomocí funkce *ee.ImageCollection* (řádek 23 na obr. 20). V této datové sadě je teplota záření zemského povrchu ošetřena o vliv atmosféry (viz kapitola 5.1). Časové období je určeno pomocí funkce *.filterDate*, v našem případě se jedná o roky 2013, 2020 a celkový průměr za roky 2013–2020. Dále bylo potřeba vypočítat NDVI index za pomoci blízkého infračerveného pásma a červeného pásma (řádek 38–46). Dalším krokem bylo nastavení spektrálního pásma 10, tedy hodnoty BT bez nutnosti ošetření o vliv atmosféry a další korekce.

```
21 //load the collection:
22 {
23 var col = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
24 .map(maskL8sr)
25 .filterDate('2013-01-01', '2020-12-31')
26 .filterBounds(geometry);
27 }
28 print(col, 'coleccion');
29
30 //imagen reduction
31 {
32 var image = col.median();
33 print(image, 'image');
34 Map.addLayer(image, vizParams2);
35 }
36
37
38 //median
39 {
40 var ndvi = image.normalizedDifference(['B5',
41 'B4']).rename('NDVI');
42 var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white',
43 'green']};
44 print(ndvi, 'ndvi');
45 Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'ndvi');
46 }
47
48 //select thermal band 10(with brightness tempereature), no calculation
49 var thermal= image.select('B10').multiply(0.1);
50 var b10Params = {min: 291.918, max: 302.382, palette: ['blue',
51 'white', 'green']};
52 Map.addLayer(thermal, b10Params, 'thermal');
```

Obr. 20 Zobrazení kolekce Landsat 8, nastavení NDVI indexu – editor GEE.



### 6.4.3 Popis výpočtu vegetačního poměru a emisivity

Po určení maximální a minimální hodnoty NDVI ve studované oblasti (řádky 54–50 na obr. 21) bylo možné vypočítat vegetační poměr (fractional vegetation na řádcích 72–76) a hodnoty emisivity na (79–85). Finální výpočet LST ve °C je vyjádřen v řádcích kódu 87–93. Řádky 94–99 slouží k získání finálního rastru znázorněného na obr 18.

```
54 // find the min and max of NDVI
55 {
56   var min = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
57     reducer: ee.Reducer.min(),
58     geometry: geometry,
59     scale: 30,
60     maxPixels: 1e9
61   }).values().get(0));
62   print(min, 'min');
63   var max = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
64     reducer: ee.Reducer.max(),
65     geometry: geometry,
66     scale: 30,
67     maxPixels: 1e9
68   }).values().get(0));
69   print(max, 'max')
70 }
71
72 //fractional vegetation
73 {
74   var fv = (ndvi.subtract(min).divide(max.subtract(min))).pow(ee.Number(2)).rename('FV');
75   print(fv, 'fv');
76   Map.addLayer(fv);
77 }
78
79 //Emissivity
80
81 var a= ee.Number(0.004);
82 var b= ee.Number(0.986);
83 var EM=fv.multiply(a).add(b).rename('EMM');
84 var imageVisParam3 = {min: 0.9865619146722164, max:0.989699971371314};
85 Map.addLayer(EM, imageVisParam3,'EMM');
86
87 //LST in Celsius Degree bring -273.15
88 //NB: In Kelvin don't bring -273.15
89 var LST = thermal.expression(
90   '(Tb/(1 + (0.00115* (Tb / 1.438))*log(Ep)))-273.15', {
91     'Tb': thermal.select('B10'),
92     'Ep': EM.select('EMM')
93   }).rename('LST');
94 Map.addLayer(LST, {min: 20.569706944223423, max:29.328077233404645, palette: [
95   '040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',
96   '0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',
97   '3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',
98   'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',
99   'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'
100 ]}, 'LST');
```

Obr. 21 Další dílčí nastavení v kódu pro výpočet LST – editor GEE.

#### 6.4.4 Export dat z GEE a finální úprava

Pro kvalitnější práci s rastrem je lepší výsledný snímek exportovat a upravit v externím aplikaci jako je např. ArcGIS. V poslední části kódu jsem za pomoci funkce *Export.image.toDrive* vyexportoval výsledky na účet Google disk, pod kterým jsem přihlášen v aplikaci GEE. V tomto případě jsem pojmenoval obrázek Praha, zvolil složku GEE na disku, zachoval georeferenční koordinační systém EPSG 3857, který je typický pro produkty od Googlu.

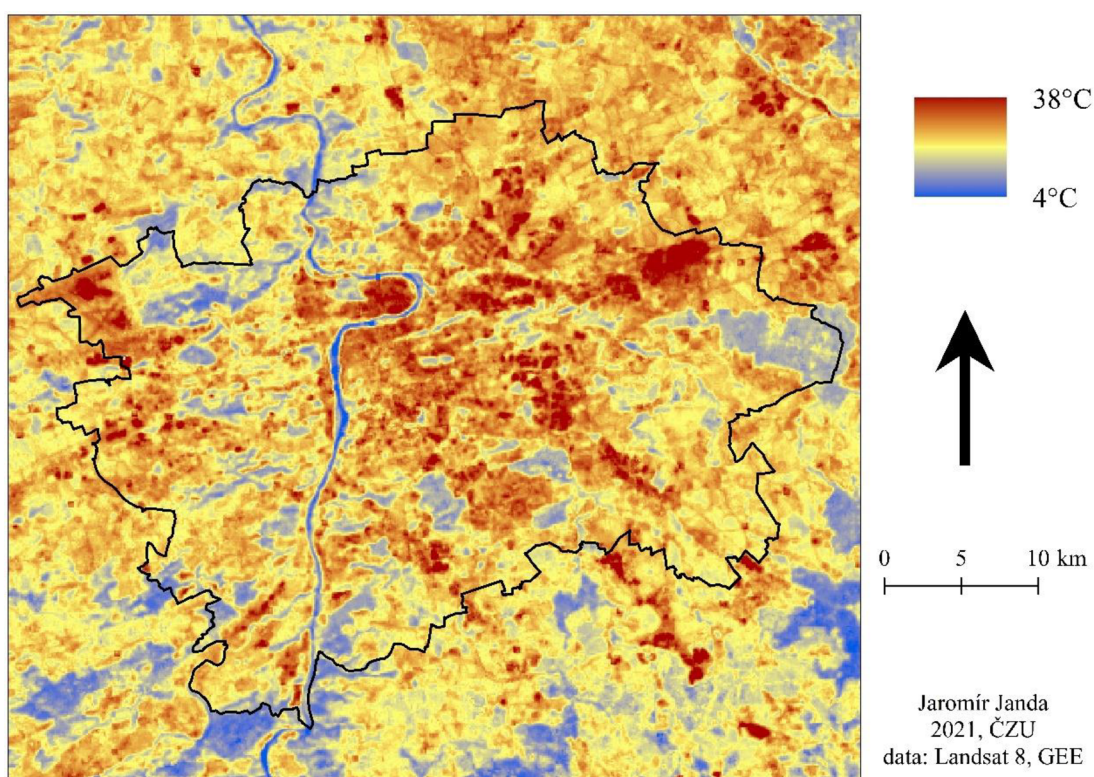
```
102 - Export.image.toDrive({  
103     image: LST,  
104     folder: 'GEE',  
105     description: 'Praha',  
106     region: geometry,  
107     crs: 'EPSG:3857',  
108     maxPixels: 1e9  
109 });
```

**Obr. 22** Nastavení a export – editor GEE.

Prostřednictvím editoru GEE jsem vyexportoval na Google disk černobílé rastrové obrázky, které jsem v programu ArcGIS 10 upravil do výsledné podoby mapy i s legendou (obr. 23–25). Pomocí funkce Zonal Statistics jsem vypočítal základní charakteristiky povrchové teploty na území Prahy ve vybraných obdobích.

#### 6.4.5 Výsledek

Obr. 23 představuje výslednou mapu prostorového rozložení průměrné povrchové teploty (LST) v Praze a okolí za roky 2013–2020. V souladu s poznatky výše citovaných studií je možné vidět, že místa s nejvyšší LST odpovídají místům s nejhustší zástavbou. Nejvyšší povrchovou teplotu zaznamenalo centrum města, letiště Praha a průmyslové zóny jako jsou Černý most, Hostivař, Průhonice a Horní Počernice. Mezi nejchladnější oblasti naopak patří vodní toky, místa s velkým výskytem zeleně jako jsou parky, údolí nebo přírodní rezervace. Do této kategorie spadá například přírodní rezervace Divoká Šárka, Prokopské údolí, Modřanská rokle nebo Přírodní park Hostivař – Záběhlíce.



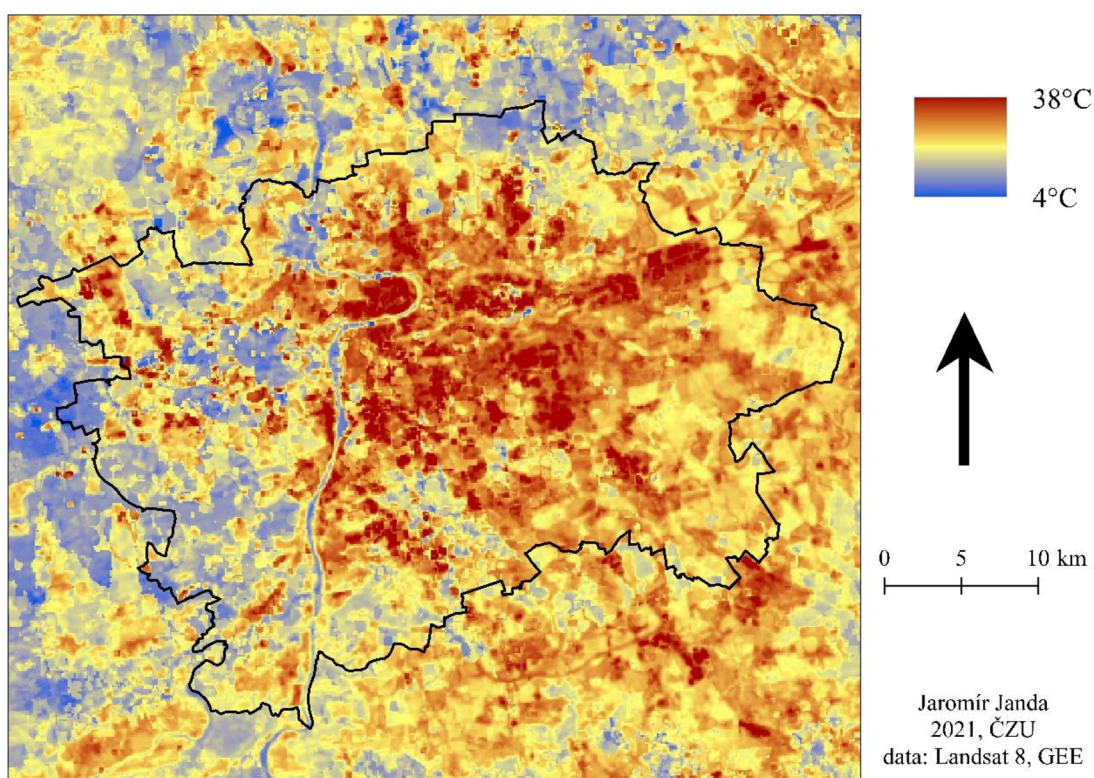
**Obr. 23** Prostorové rozložení průměrné LST v Praze mezi lety 2013 až 2020.

Porovnáním výsledků rozložení povrchové teploty v roce 2013 (obr. 24) s rokem 2020 (obr. 25) v tab. 6 ukazuje, že průměrná LST byla v obou letech vyšší než průměr za celé období. Zároveň byla roce 2020 (22,0 °C) zaznamenána vyšší průměrná LST než v roce 2013 (21,0 °C), přestože nejvyšší hodnota LST byla pozorována v roce 2013. Ve stejném roce byla zároveň pozorována i nejnižší hodnota LST, což naznačuje méně rovnoměrné rozložení LST v roce 2013 než v roce 2020. Na obr. 24 je patrné, že zejména levý břeh Vltavy byl v roce 2013 výrazně chladnější než v roce 2020. V roce 2013 zasáhly Prahu povodně i silné vlny veder podle Českého

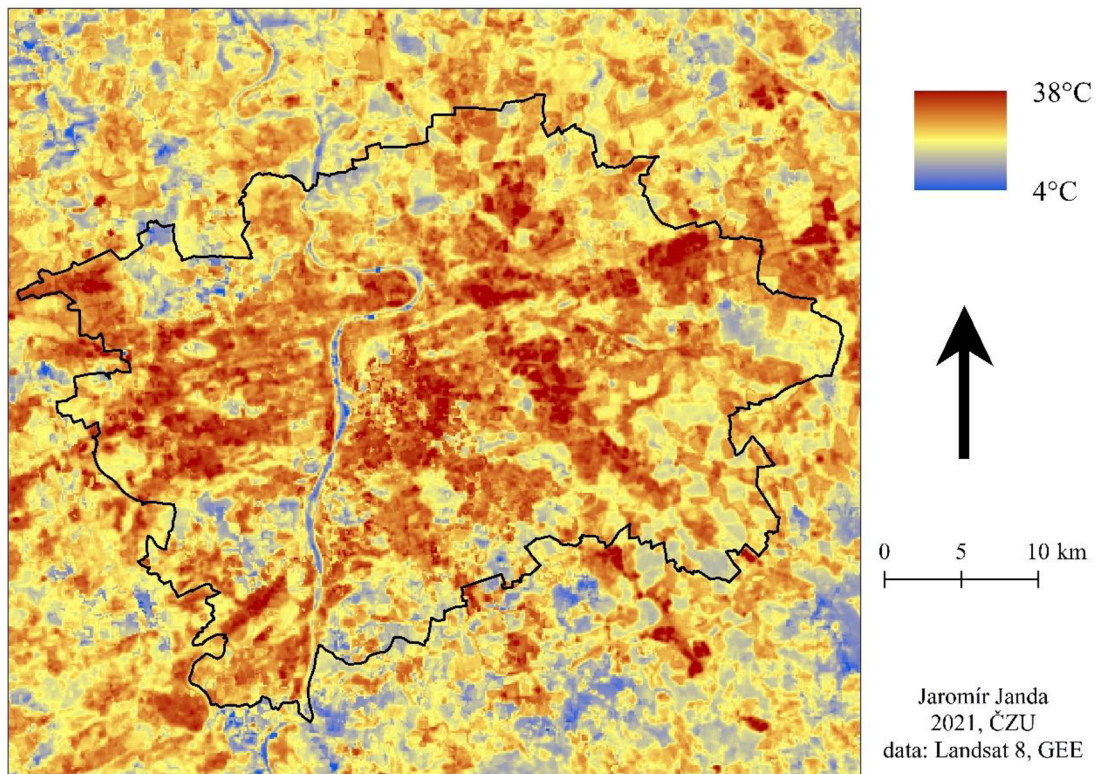
hydrometeorologického ústavu (<https://www.chmi.cz/>), což mohlo způsobit atypické prostorové rozložení LST v tomto roce.

**Tab 6** Hodnoty průměrné LST na území Prahy za vybrané roky. T prům. značí průměrné hodnoty ze všech pixelů na území prahy, T max. značí nejvyšší hodnotu LST a T min. značí nejnižší hodnotu LST.

	<b>T prům.</b>	<b>T max.</b>	<b>T min.</b>
2013–2020	20,0 °C	32,0 °C	11,0 °C
2013	21,0 °C	37,6 °C	8,0 °C
2020	22,0 °C	35,5 °C	12,0 °C



**Obr. 24** Prostorové rozložení průměrné LST v Praze v roce 2013.



**Obr. 25** Prostorové rozložení průměrné LST v Praze od roku 2020.

## 7 Diskuze

Z analyzovaných studií (v kapitole 6) je patrné, že největší výhodou GEE je schopnost zpracování velkého množství dat v krátkém časovém intervalu, což donedávna bylo prakticky nemožné. Další podstatnou výhodou jsou stejné výchozí podmínky pro všechny vědce používající platformu GEE. K využití GEE stačí hardwarové vybavení, připojení k internetu a zdarma dostupný účet od společnosti Google. To umožňuje stejně kvalitní a rozsáhlé studie i v méně vyspělých státech a rozvojových zemích.

Případové studie ukazují potenciál a využití GEE v aplikacích pro městské prostředí, jako studium vlivu rostoucí zástavby na zvyšující se povrchovou teplotou země (Ravanelli et al., 2018) nebo zkoumání intenzity tepelného ostrova (Najafzadeh et al., 2021).

V České republice bylo publikováno několik studií, jako např. Dobrovolný (2013) nebo Geletič et al. (2016), zkoumajících změny v povrchové teplotě v českých městech pomocí metod dálkového průzkumu Země. Tyto studie však své výsledky interpretují na základě analýzy několika satelitních snímků z vybraných dnů ve studovaném období. Tím pádem jsou jejich výsledky méně robustní a přesné než u výše uvedených zahraničních studií využívajících výpočetní kapacitu a datový katalog GEE. Studie prováděné pomocí GEE zpracovávají snímky v počtech vyšších desítek, stovek nebo dokonce i tisíců snímků. Např. autoři Geletič et al. (2016), kteří se ve své studii zabývali rozložením povrchové teploty země v Praze a Brně podle typu krajinného pokryvu, uvádí, že pro svoji analýzu využili v každém městě pouze 4 snímky z dvou družicových systémů (dohromady 8 satelitních snímků za 8 let v Praze a 13 let v Brně). Naproti tomu Ravanelli et al. (2018) mohli pomocí GEE rychle a efektivně zpracovat více než 6000 snímků z družice Landsat 8 (za roky 1992–2011 v 6 městech), což značí výrazný posun v možnostech analýzy městského klimatu pomocí satelitních dat.

Vybrané případové studie ukázaly širokou škálu využití GEE v městském klimatu. Z výsledků studií je zřejmé, že problémy spojené s urbanizací měst narůstají a jsou aktuálním tématem pro vědce z celého světa. GEE utváří cestu pro možné globální monitorování tepelného ostrova města a poskytuje možnost získání cenných znalostí pro udržitelné plánování našich měst.

## 8 Závěr a přínos práce

V této bakalářské práci představuji formou literární rešerše problematiku klimatu měst a metody dálkového průzkumu Země pro jeho zkoumání. Důležitým aspektem práce je představení prostředí Google Earth Engine (GEE), programovacího jazyka, funkcí a dostupných souborů dat, a na základě rešerše vybraných studií vyhodnocení možností využití nástroje GEE ve studiích zabývajících se časoprostorovými změnami v rozložení povrchové teploty v městském prostředí.

Součástí práce je také praktická ukázka výpočtu povrchové teploty země a jejího rozložení pro Prahu a její okolí za pomoci analýzy satelitních snímků Landsat 8 v prostředí GEE. Výsledky ukázaly, že v Praze stejně jako v obdobných metropolích dochází k nárůstu průměrné teploty povrchů, což může být mimo jiné známka rozrůstající se městské zástavby a rostoucího vlivu městského tepelného ostrova. Průměrná povrchová teplota byla za rok 2020 vyšší než za rok 2013, a povrchové rozložení teploty ukazuje nárůst intenzity tepelného ostrova Prahy za roky 2013–2020.

Ve městech vyspělých i rozvojových států se rok od roku koncentruje stále více obyvatel, z čehož plyne celá řada problémů a výzev. Proto získávají na stále větší důležitosti studie a projekty zabývající se problematikou městského klimatu, městského tepelného ostrova, jeho příčinami a následky. Politici a městští architekti mohou využít data a potenciál GEE, aby dokázali plánovat trvale udržitelná města po celém světě.

## 9 Seznam použitých zdrojů

### 9.1 Tištěné dokumenty

Akbari, H. a kol., 2008: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies (Urban Heat Island Basics). U. S. Environmental Protection Agency, s. 22.

Arthur, C., Hayes L., 2007: Introduction to Remote Sensing second edition. Taylor et Francis, Boca Raton, ISBN 978-0849-39255-9.

Avdan, U., Jovanovska, G., 2016: Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. Journal of Sensors. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>.

Deardorff, J.W., 1978: Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, with Inclusion of a Layer of Vegetation. Journal of Geophysical Research, 83, 1889-1903. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC083iC04p01889>.

Dobrovolný, P., 2012: Klima Brna: víceúrovňová analýza městského klimatu. Brno: Masarykova univerzita. ISBN 978-80-210-6029-6.

Gartland, L., 2008: Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas. Taylor et Francis, New York, ISBN 978-1-84971-298-9.

Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P. 2016: Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. *Remote Sensing*. 8(10):788. <https://doi.org/10.3390/rs8100788>

Goerlick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyuschenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017: Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, Remote Sensing of Environment. 202, 18–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

Chu, L., Oloo, F., Bergstedt, H., Blaschke, T., 2020: Assessing the link between human modification and changes in land surface temperature in hainan, china using



image archives from google earth engine, Remote Sensing. 12(5), 888 DOI:

<https://doi.org/10.3390/rs12050888>

Kumar, L., Mutanga, O., 2018: Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. Remote Sensing..

DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10101509>

Liu, X., Zhou Y., Yue, W., Li, X., Liu, Y., Lu, D., 2020: Spatiotemporal patterns of summer urban heat island in Beijing, China using an improved land surface temperature. Journal of Cleaner Production, 257: 120529. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120529>.

Maktav, D., Erbek, F. S., Jürgens, C., 2005: Remote Sensing of Urban Areas, International Journal of Remote Sensing, 26:4, 655–659, DOI:

10.1080/01431160512331316469.

Moore R. T., Hansen., M. C., 2011: Google Earth Engine: a new cloud–computing platform for global–scale earth observation data and analysis, AGU Fall Meeting Abstracts.

Najafzadeh, F., Mohammadzadeh, A., Ghorbanian A., Jamali, S., 2021: Spatial and Temporal Analysis of Surface Urban Heat Island and Thermal Comfort Using Landsat Satellite Images between 1989 and 2019: A Case Study in Tehran, Remote Sensing. 13(21), 4469. DOI: [doi.org/10.3390/rs13214469](https://doi.org/10.3390/rs13214469).

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. a Voogt, J., A., 2017: Urban Climates. Cambridge University Press, s. 525. ISBN 978-1-107-42953-6.

Oke, T. R., 1981: Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparisons of Scale Model and Field Observations. Journal od Climatology, 1.3: s. 237–254.

Oke, T. R., 1987: Boundary Layer Climates – 2nd edition. Methuen, London, s. 435. ISBN 0-415-04319-0.

Oke, T. R., 1997: Urban Climates and Global Environmental Change. In: Thompson, R. D., Perry, A., eds.: Applied Climatology. Principles & Practices. Routledge, London, New York, s. 273–287.

Shetty, A., Umesh, P. & Shetty, A., 2022: An exploratory analysis of urbanization effects on climatic variables: a study using Google Earth Engine. Model. Earth Syst. Environ., 1363–1378. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01157-w>.

Tan, J., et al., 2010: The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. International journal of biometeorology, 54.1: 75-84. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>.

Weng, Q., Dale Q., Paolo G., 2018: Urban Remote Sensing second edition. Taylor et Francis, Boca Raton, ISBN 978-0-367-57204-4.

Xian, G., 2016: Remote Sensing Applications for the Urban Enviroment. Taylor et Francis, Boca Raton, ISBN 978-1-4200-8984-4.

## 9.2 Elektronické dokumenty

Earth Engine Data Catalog [online], 2022. Google Developers [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets>

Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky 2013. [online], 2014. Český hydrometeorologický ústav. Úsek hydrologie. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/opzv/voda/rezim/bilance/zprava\\_bilance\\_13.pdf](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/opzv/voda/rezim/bilance/zprava_bilance_13.pdf)

Landsat Science [online], 2022. NASA [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/>

Landsat Science [online], 2022. NASA [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>

Landsat Science [online], 2022. NASA [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-bands/>

Landsat 8 [online], 2022. USGS [cit. 2022-02-30]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431160512331316469?needAccess=true>

MODIS Web. [online], 2022. NASA [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

MODIS Web. [online], 2022. NASA [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>

MODIS Web. [online], 2022. NASA [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

NASA's Terra satellite. [online], 2022. NASA [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.eumetsat.int/20th-anniversary-nasas-terra-satellite>

Sentinel Online [online], 2022. NASA [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>

Sentinel Online [online], 2022. NASA [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/overview>

Sentinel Online [online], 2022. NASA [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

World urbanization prospects. [online], 2018. OSN [cit. 2022-01-18] Dostupné z:  
<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

## 10 Seznam použitých obrázků a tabulek

**Obr. 1:** Vlnové délky jednotlivých pásem skenerů družic Landsat. Senzor MSS (4 pásma) nesl Landsat 1, 2 a 3, senzor TM (7 pásem) Landsat 4 a 5, senzor ETM+ (8 pásem) Landsat 7 a skenery OLI/OLI-2 a TIRS/TIRS-2 (11 pásem) Landsat 8 a 9.

**Obr. 2:** Přístroj MODIS.

**Obr. 3:** Spektrální pásma družice Sentinel-2.

**Obr. 4:** Měřítka městského klimatu (Oke, 1997).

**Obr. 5:** Schéma postupu výpočtu LST.

**Obr. 6:** Katalog používaný v platformě GEE.

**Obr. 7:** Editor GEE.

**Obr. 8:** Široká kategorizace aplikačních oborů GEE napříč 300 studii v průzkumu.

**Obr. 9:** Mapy ročního mediánu teplot zemského povrchu v Atlantě pro roky 1994 (vlevo) a 2010 (vpravo), vypočtené pomocí CE ze všech snímků Landsat získaných z GEE.

**Obr. 10:** Situace krajinného pokryvu v Atlantě v roce 1992 (a) a v roce 2011 (b). Červená barva znázorňuje urbanizované území, zelená barva kultivované území, tmavě zelená barva lesy/křovinné porosty.

**Obr. 11:** Prostorové rozložení změny roční průměrné teploty na ostrově Chaj-nan mezi roky 2000-2016, zelené oblasti značí snížení teploty, červené oblasti znamenají nárůst teploty povrchů.

**Obr. 12:** Rozložení indexu lidské modifikace v teplotních zónách na ostrově Chaj-nan v roce 2016.

**Obr. 13:** Koeficient determinace mezi teplotou průměrnou (a), maximální (b) a standardní odchylkou (c) a indexem lidské modifikace na ostrově Chaj-nan.

**Obr. 14:** Index lidské modifikace a průměrných teplot zemského povrchu na ostrově Chaj-nan podle typu krajinného pokryvu na ostrově.

**Obr. 15:** Ukazatel průměrné měsíční intenzity UHI v reprezentativních letech (2003, 2006, 2009, 2010, 2014, 2018) v Pekingu za měsíce červen, červenec a srpen.

**Obr. 16:** Ukazatel SUHI v roce 2019 v Teheránu, (a) jaro, b (léto), c (podzim), d (zima),  $a_0$  značí průměrnou intenzitu SUHI oblasti vyznačené elipsou,  $a_x$  a  $a_y$  jsou parametry os elipsy značící prostorový rozsah SUHI.

**Obr. 17:** Lokality Prahy použité v GEE.

**Obr. 18:** Polygon v okolí Prahy znázorňující oblast zpracování satelitních snímků Landsat v editoru GEE.

**Obr. 19:** Nastavení zachytávání oblačnosti na snímcích z Landsatu 8 – editor GEE.

**Obr. 20:** Zobrazení kolekce Landsat 8, nastavení NDVI indexu – editor GEE.

**Obr. 21:** Další dílčí nastavení v kódu pro výpočet LST – editor GEE.

**Obr. 22:** Nastavení a export – editor GEE.

**Obr. 23:** Prostorové rozložení průměrné LST v Praze mezi lety 2013 až 2020.

**Obr. 24:** Prostorové rozložení průměrné LST v Praze v roce 2013.

**Obr. 25:** Prostorové rozložení průměrné LST v Praze od roku 2020.

**Tab. 1:** Spektrální pásma s možností využití a vlnovou délkou u družic Landsat 8 a 9.

**Tab. 2:** Přehled vybraných družic a jejich specifikace.

**Tab. 3:** Hodnoty albeda ( $\alpha$ ) a emisivity ( $\epsilon$ ) pro vybrané druhy urbánních a přirozených povrchů.

**Tab. 4:** Hodnoty NDVI pro různé druhy povrchů.

**Tab. 5:** Počet publikací využívajících platformu GEE publikovaných každý rok od počátku GEE do roku 2017. Údaje za rok 2017 jsou pouze do 30. června.

**Tab. 6:** Hodnoty průměrné LST na území Prahy za vybrané roky. T prům. značí průměrné hodnoty ze všech pixelů na území Prahy, T max značí nejvyšší hodnotu LST a T min značí nejnižší hodnotu LST.