

Tradiční a nové přístupy ke studiu tepelného prostředí člověka ve městě: kritické shrnutí současného stavu poznání

MICHAL LEHNERT¹, JAN GELETIČ^{2,3}, MARTIN JUREK¹

¹ Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, katedra geografie, Olomouc, Česko (Palacký University, Faculty of Science, Department of Geography, Olomouc, Czechia); e-mail: m.lehnert@upol.cz, martin.jurek@upol.cz

² Ústav informatiky Akademie věd ČR, oddělení složitých systémů, Praha, Česko (Institute of Computer Science of the Czech Academy of Sciences, Department of Complex Systems, Prague, Czechia); e-mail: geletic@cs.cas.cz

³ Ústav výzkumu globální změny Akademie věd ČR, Brno, Česko (Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences, Brno, Czechia)

ABSTRACT Traditional and novel approaches to studying the human thermal environment in urban areas: A critical review of the current state of the art – Traditional approaches to researching the urban thermal environment focus on identifying the specific manifestations of the local climate and microclimate within urban structures and various types of urban development, and on detecting urban heat islands using meteorological station data, mobile measurements, remote sensing, and (micro)climatic modelling. Nonetheless, current manifestations of climate change and its projections into the future bring the need for the effective climatic adaptation of urban environments. Current research focuses on approaches allowing for a more complex assessment of both the thermal and overall environment of people in towns and cities. This requires numerical modelling in high spatial resolution and large questionnaire surveys. Despite many unanswered theoretical and methodological questions, the approaches to and knowledge of the human urban thermal environment demonstrate growing application potential.

KEY WORDS urban climate – urban heat island – thermal exposure – thermal comfort – thermal sensation

LEHNERT, M., GELETIČ, J., JUREK, M. (2023): Tradiční a nové přístupy ke studiu tepelného prostředí člověka ve městě: kritické shrnutí současného stavu poznání. *Geografie*, 128, 3, 351–377.

<https://doi.org/10.37040/geografie.2023.012>

Do redakce došlo v prosinci 2022, přijato do tisku v březnu 2023.

1. Úvod

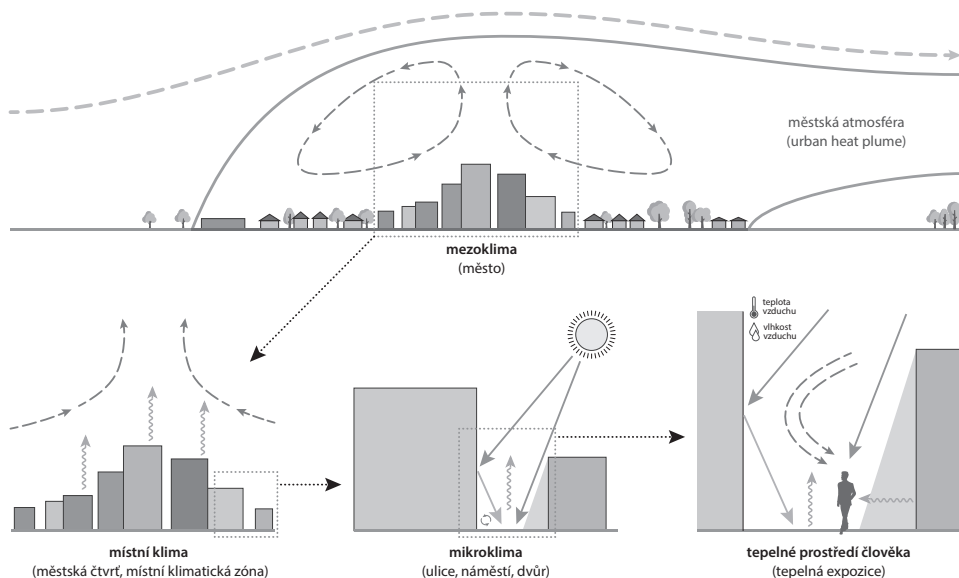
Specifické tepelné prostředí měst patří k významným faktorům životního prostředí městských populací. Ve městech dnes přitom žije více než polovina lidstva (OSN 2018). Městské teplo je častou příčinou environmentálního stresu, ovlivňuje životní spokojenost, zdraví a úmrtnost obyvatel (Kovats, Hajat 2008) a působí na řadu dalších faktorů, které ovlivňují jak přírodní (Schmidt, Poppendieck, Jensen 2014), tak i socioekonomické prostředí měst (Santamouris a kol. 2001). Oteplování a rostoucí extremita klimatu (IPCC 2021) současně vede k potřebě adaptace na tyto změny (Rosenzweig a kol. 2018) a problematika tepelného prostředí města si žádá i v oblasti střední Evropy více pozornosti než kdy dříve.

Tepelnému prostředí člověka ve městě a souvisejícím teoreticko-metodologických konceptům a přístupům nebyla dosud v česky psané literatuře věnována větší pozornost, na rozdíl od výzkumu fenoménu tepelného ostrova města. Zřejmě i proto v české územně-plánovací praxi nezdávka dochází k situacím, kdy záměr zpříjemnit tepelné prostředí města vede k přijímání neefektivních nebo nevhodných adaptačních opatření (Geletič a kol. 2020). Současnou hlavní adaptační prioritou českých měst je problematika vodního režimu a hospodaření s vodou (Aubrechtová a kol. 2019; Křištofová a kol. 2022; Krkoška Lorencová, Loučková, Vačkářů 2019), ovšem Urban a kol. (2022) prokazatelně dokládá, že teplotní extrémy ve městech mají na svědomí už i rostoucí počet úmrtí. Cílem této přehledové studie je proto shrnout a kriticky zhodnotit současné přístupy a metody studia tepelného prostředí města a člověka ve městě, a v důsledku tím přispět k šíření aktuálních poznatků o této problematice v českém prostředí.

2. Teoretický základ: koncepty a pojmy

Tepelné prostředí města se od okolní příměstské a venkovské krajiny odlišuje charakterem radiační a tepelné bilance. Tyto odlišnosti jsou podmíněny především celkově větší plochou (aktivního) povrchu, specifickým geometrickým uspořádáním městských struktur, charakteristickými radiačními a tepelnými vlastnostmi antropogenních povrchů, antropogenním (odpadním) teplem z provozu budov, dopravy a průmyslu, menším výparem a modifikací proudění vzduchu vlivem městských struktur (Kleerekoper, van Esch, Salcedo 2012; Oke 2002). V důsledku toho je v průměru a po většinu času v městském prostředí akumulováno a uvolňováno více tepla než v okolní krajině. Hovoříme o „městském teplu“. Anglický termín *urban heat load* nemá v češtině zažitý překlad, teplo je v tomto kontextu většinou chápáno širěji a obecněji než „zjevné teplo“ neboli entalpie a neodpovídá ani českým významům pojmů „tepelná zátěž“, „tepelné zatížení“ apod.

Při studiu tepelného prostředí města je pevně etablována především klimatologická perspektiva tradičně spojená s výzkumem tepelného ostrova města (UHI – *Urban Heat Island*; Stewart 2019). O tepelném ostrovu města hovoříme, pokud jsou rozdíly teploty vzduchu mezi městem a okolní krajinou kladné a jsou determinovány specifickými radiačními a tepelnými vlastnostmi prostředí města jako důsledek lidské činnosti. V případě, kdy jsou teplotní rozdíly mezi městem a okolní krajinou vyjádřeny na základě povrchové teploty, hovoříme o tzv. povrchovém tepelném ostrovu města (SUHI – *Surface Urban Heat Island*). Tepelný ostrov města a povrchový tepelný ostrov města se od sebe liší nejen svými projevy, ale i podstatou (podrobněji Geletič a kol. 2020). Intenzita tepelného ostrova města je dnes ve snaze o standardizaci výzkumu v souladu se Stewart, Oke (2012) definována jako „rozdíl teploty mezi zastavěnou místní klimatickou zónou (LCZ – *Local Climate Zone*) s nejvyšší teplotou ve městě (ve střeoevropských podmínkách nejčastěji místní klimatická zóna 2 středně vysoká kompaktní zástavba) a převládající nezastavěnou místní klimatickou zónou v okolí města (ve střeoevropských podmínkách nejčastěji místní klimatická zóna D nízká vegetace)“. I tato definice tepelného ostrova města čelí kritice vzhledem k nejednotné metodice vymezování místních klimatických zón a relativně nízké přesnosti některých metod klasifikace místních klimatických zón (Lehnert a kol. 2021b). Bude proto určující, jaké další směřování studia tepelného ostrova města a povrchového tepelného ostrova města



Obr. 1 – Prostorová úroveň a úroveň podrobnosti studia tepelného prostředí (člověka) ve městě (upraveno podle Murakami a kol. 1999, Oke 2002)

vzejde z diskuze, která v současnosti probíhá v odborných kruzích (Manoli a kol. 2019; Martilli, Krayenhoff, Nazarian 2020; Manoli a kol. 2020). Ke studiu tepelného prostředí města je totiž možné přistupovat mnohem komplexněji a v různých prostorových úrovních (Mills, Stewart, Niyogi 2022; obr. 1).

V posledních dvou desetiletích je ve výzkumu tepelného prostředí města kladen stále větší důraz na člověka, jeho pocity, preference, chování a využívání městského prostoru – zmíněný přístup je označován jako „*people oriented paradigm*“ (Schnell a kol. 2021). V této perspektivě je vhodnější hovořit o „tepelném prostředí člověka ve městě“ než o samotném „tepelném prostředí města“. Uvedený přístup vzniká na pozadí pragmatismu, který v opodstatněných a logicky zdůvodnitelných případech integruje metody s rozdílným epistemologickým pozadím tam, kde je potřeba jednat, změnit situaci a její důsledky (Lenzholzer, Duchhart, Koh 2013). Vedle empirických pozorování a modelování tepelné expozice (viz níže) jsou proto zohledňovány také kulturní a estetické hodnoty a v rámci (geo)participace také pocity, názory, postoje a zkušenosti obyvatel měst, které mohou být v případě kvantitativně orientovaného výzkumu generalizovány na základě reprezentativního vzorku respondentů a vhodných statistických metod.

V kontextu studia vlivů tepelného prostředí města na úrovni lidského jedince nelze samotnou teplotu a od ní odvozené parametry (intenzita tepelného ostrova, teplotní rozdíly místních klimatických zón apod.) považovat za dostatečně vypovídající charakteristiky. Tepelné prostředí člověka ve městě (Parsons 2014), resp. tepelná expozice (*thermal exposure*) člověka ve smyslu Middel, Krayenhoff (2019) je kromě teploty vzduchu utvářena také zářením, prouděním vzduchu a vlhkostí vzduchu. Tepelná expozice představuje hlavní komponentu environmentální složky tepelného komfortu člověka. Vzhledem k náročnosti výzkumu dosud nebyla důkladně popsána její prostorová proměnlivost v prostředí města.

Klíčovým faktorem časoprostorové proměnlivosti tepelné expozice ve městě je záření (Mayer a kol. 2008), které je obvykle vyjadřováno pomocí střední radiální teploty. Přesný výpočet střední radiální teploty zůstává poměrně složitou metodickou otázkou (Vanos a kol. 2021). Důležitou roli při stanovení tepelné expozice v městském prostředí hraje také časoprostorová proměnlivost proudění vzduchu. Oba zmíněné faktory jsou zahrnuty v komplexnějších biometeorologických indexech (přehled např. Potchter a kol. 2018), z nichž se ve středoevropském regionu v současnosti používají především dva (tab. 1): UTCI – *Universal Thermal Climate Index* (Jendritzky, de Dear, Havenith 2012) a PET – *Physiological Equivalent Temperature* (Höppe 1999; Matzarakis, Mayer, Iziomon 1999). V některých studiích jsou nicméně vzhledem ke své jednoduchosti nadále používány také teplotně-vlhkostní indexy. K využívání těchto indexů se v dnešní době stavíme kriticky, jelikož mají z hlediska tepelné expozice nízkou vypovídací hodnotu. Mnohé komplexní indexy (včetně UTCI a PET) však na druhou stranu nelze považovat za čisté klimatické ukazatele, jelikož uvažují biofyzikální procesy ovlivňující termoregulaci

Tab. 1 – Kategorie tepelného stresu a odpovídající intervaly hodnot indexů UTCI a PET

UTCI [°C]	Tepelný stres	PET [°C]	Tepelný stres
46,1 a více	extrémní stres z tepla	41,1 a více	extrémní stres z tepla
38,1 až 46,0	velmi silný stres z tepla	35,1 až 41,0	silný stres z tepla
32,1 až 38,0	silný stres z tepla	29,1 až 35,0	mírný stres z tepla
26,1 až 32,0	mírný stres z tepla	23,1 až 29,0	nepatrný stres z tepla
9,1 až 26,0	bez tepelného stresu	18,1 až 23,0	bez tepelného stresu
0,1 až 9,0	nepatrný stres z chladu	13,1 až 18,0	nepatrný stres z chladu
-12,9 až -0,0	mírný stres z chladu	8,1 až 13,0	mírný stres z chladu
-26,9 až -13,0	silný stres z chladu	4,1 až 8,0	silný stres z chladu
-39,9 až -27,0	velmi silný stres z chladu	4,0 a méně	extrémní stres z chladu
-40,0 a méně	extrémní stres z chladu		

Zdroj: Błażejczyk a kol. 2014; Matzarakis, Mayer, Iziomon 1999

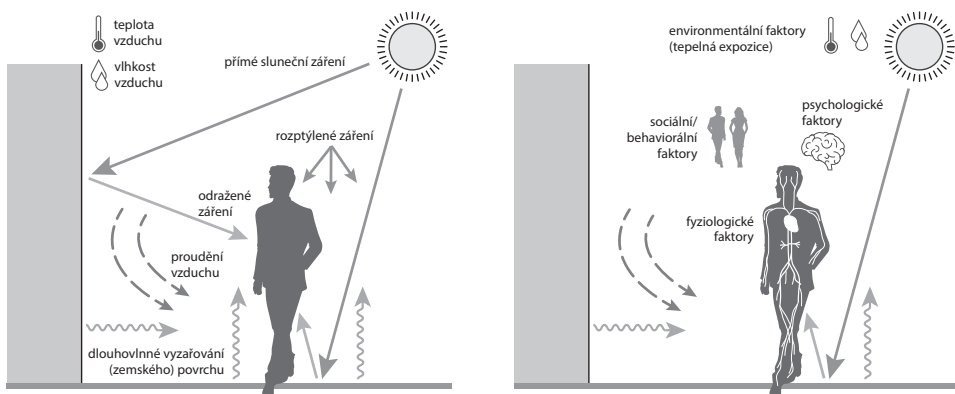
a částečně také reaktivní adaptaci člověka. Velmi striktně vzato by proto neměly být používány ve studiích, které pracují s delšími časovými řadami (desítky let).

Výsledné hodnoty biometeorologických indexů mohou být interpretovány jako tzv. pocitová teplota. Definice pocitové teploty není ustálená a liší se mj. v závislosti na použitém indexu. Subjektivní pocitová teplota konkrétního jedince v daném místě se od této hodnoty může odlišovat v závislosti na jeho momentální činnosti, fyziologických parametrech, oblečení a psychickém rozpoložení. Pocitovou teplotu je však chybné zaměňovat s tepelným komfortem.

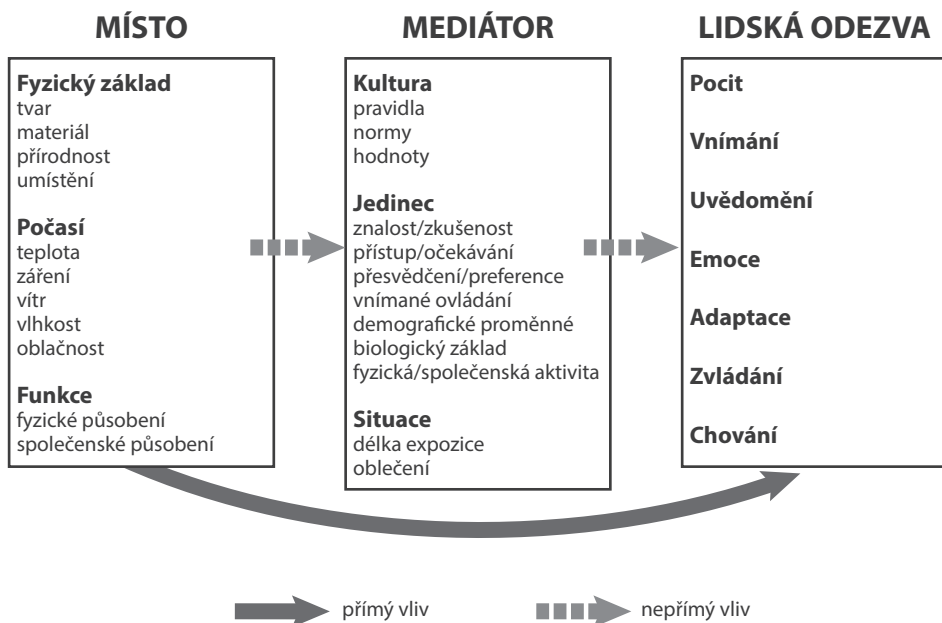
Tepelný komfort (anglicky *thermal comfort*) je definován širěji jako stav mysli, který vyjadřuje spokojenost člověka s tepelným prostředím (ASHRAE 2017). V případě nespokojenosti hovoříme o tepelném diskomfortu, který může být doprovázen tepelnou zátěží organismu (*thermal strain*) a tepelným stresem (*thermal stress*) – stresem z chladu (*cold stress*) nebo stresem z tepla (*heat stress*; ČSN ISO 9886:2004). Tepelný komfort je dán tepelným pocitem a jeho vnímáním a prožíváním člověkem, kromě tepelného prostředí jej tedy ovlivňuje řada dalších faktorů (obr. 2). Jedná se proto o komplexní koncept zahrnující environmentální, fyziologické, psychologické (psychofyziologické) a sociální/behaviorální složky (Chen, Ng 2012). Environmentální složka tepelného komfortu zahrnuje nejen výše uvedenou tepelnou expozici (byť ta je její hlavní složkou), ale širěji i další podmínky prostředí – hluk, znečištění ovzduší apod. (Knez a kol. 2009; Schnell a kol. 2016).

Faktory ostatních složek tepelného komfortu (fyziologické, psychologické a sociální/behaviorální) můžeme považovat převážně za individuální (oblečení, tepelná paměť a historie organismu, fyzická aktivita, fyziologické vlastnosti), či úžeji za subjektivní (tepelný pocit, vliv očekávaného tepelného prostředí a související spokojenost s tepelným prostředím) (Nikolopoulou, Baker, Steemers 2001). Vnímání a prožívání tepelného prostředí se proto u každého jedince liší

v důsledku mnoha lépe či hůře objasněných faktorů. Tyto individuální faktory mohou být dále kvantifikovány, hodnoceny a generalizovány (Fiala a kol. 2012, Havenith a kol. 2012). Souhrnně hovoříme o „lidském faktoru“ tepelného komfortu (Nikolopoulou, Baker, Steemers 2001). Je důležité vést v patrnosti, že jednotlivé složky a faktory tepelného komfortu nejsou izolované, ale vzájemně provázané a interagující (Shooshtarian 2019). V tomto smyslu uvažuje také Knez



Obr. 2 – Tepelná expozice (vlevo) a tepelný komfort (vpravo)



Obr. 3 – Přímý a nepřímý vliv místa na tepelný komfort (upraveno podle Knez a kol. 2009)

a kol. (2009), když pracuje s konceptem místa, které přímo a nepřímo ovlivňuje tepelné pocity a tepelný komfort (obr. 3). Podobně lze na vyšší prostorové úrovni uvažovat o vlivu (urbánní) krajiny na tepelný komfort.

3. Metody výzkumu tepelného prostředí (člověka) ve městě

3.1. Stacionární měření

Účelové staniční měření je spojeno se samými počátky výzkumu tepelného prostředí města a hraje klíčovou úlohu během tzv. klasické éry výzkumu městského klimatu (Stewart 2019). Během 20. století a na začátku 21. století se systematické pozorování na meteorologických/klimatologických stanicích ve městě rozšiřuje díky zakládání účelových staničních sítí (Muller a kol. 2013a). Trendem je dnes integrace staničních sítí do větších celků a vytváření datové základny pro otevřený a transparentní výzkum městského klimatu (např. *FAIR Network of micrometeorological measurements*) a jejich standardizace (Muller a kol. 2013b). V Česku zatím fungují monitorovací sítě pro výzkum městského klimatu bohužel spíše izolovaně (Dobrovolný a kol. 2012, Vysoudil a kol. 2012). Využít lze i některých stanic Českého hydrometeorologického ústavu umístěných v městském prostředí (např. Žák a kol. (2020) v Praze nebo Středová a kol. (2021) v Hradci Králové) a stanic dalších institucí nebo amatérských meteorologů, a to v případě, že splňují základní standardy meteorologického měření v městském prostředí (Oke 2004).

Mezi nejčastěji měřené prvky na městských stanicích patří teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, případně směr a rychlost větru. Měření jsou zpravidla realizována ve výšce do 2 m (Dobrovolný a kol. 2012), případně až 4 m nad zemským povrchem (Šečerov a kol. 2015; obr. 4). Umístění stanic výše nad zemským povrchem lze považovat za opodstatněné, jelikož při poměrně malých odlišnostech v denním chodu měřených prvků mohou být stanice bezpečněji umístěny přímo ve veřejném prostoru (ulice, náměstí apod.). Naopak stanice, které měří ve výšce do 2 m, se zpravidla s ohledem na riziko poškození umísťují do neveřejných prostor (dvory, zahrady apod.). Důsledkem těchto kompromisů je často nereprezentativní umístění stanic (Stewart 2011). Výjimkou nejsou ani stanice na střechách budov (obr. 4b), které z hlediska výzkumu tepelného prostředí člověka ve městě nelze považovat za příliš vypovídající.

Kromě základního využití v podobě studia teplotních rozdílů mezi jednotlivými lokalitami či místními klimatickými zónami, určování intenzity tepelného ostrova města apod. jsou dnes staniční data využívána rovněž k validaci numerických modelů (Bokwa a kol. 2019) nebo ke korekci dat z mobilního měření (Dobrovolný, Krauhala 2015). Využití dat z fixně umístěných stanic ke studiu tepelného prostředí člověka ve městě je ve většině případů bohužel nedostačující nebo nevhodné. Při



Obr. 4 – (a) Stanice síť NUNSET – Novi Sad, Srbsko (foto Savić, 7/2014), (b) stanice síť MESSO v Olomouci (foto Lehnert 6/2021), (c) přenosná stanice AHLBORN (foto: Lehnert 8/2021) a (d) pojízdná stanice MMC 1 (foto Jurek 8/2022)

studiu tepelné expozice člověka v městském prostředí se proto zpravidla přistupuje k měření na dalších výzkumných bodech pomocí přenosných meteorologických stanic, v Česku např. Lehnert a kol. (2021c) v Brně, Olomouci, Ostravě a Plzni; Chlapcová, Urban, Kyselý (2021) v Praze (obr. 4c).

Přenosné stanice jsou zpravidla vybaveny v souladu s normou ISO 7726:1998, případně uzpůsobeny pro potřeby daného experimentu ve venkovním prostředí města v souladu se standardy Světové meteorologické organizace (Oke 2004). Měřena bývá obvykle teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru a teplota kulového teploměru pro stanovení střední radiační teploty. Ke stanovení střední radiační teploty je však vhodnější měřit záření pomocí všesměrového pyrrometru, případně kombinace pyranometrů a pyrgeometrů (Kántor, Unger 2011).

Ke kontrole kvality staničních dat se používá široká paleta statistických metod (klimatologického) výzkumu včetně tzv. homogenizace dat (Štěpánek, Zahradníček, Skalák 2009). Tato problematika přesahuje zaměření článku, ale je zde vhodné aspoň zmínit, že mezi standardními a účelovými měřeními je významný metodický rozdíl, který spočívá v projevech mikroklimatu (WMO 2008), jejichž detekci může homogenizace dat ovlivnit.

3.2. Mobilní měření

Stacionární měření dokáže vzhledem k heterogenitě prostředí postihnout časoprostorovou proměnlivost tepelného prostředí ve městě jen v omezené míře. K tradičním metodám výzkumu tepelného prostředí města proto řadíme mobilní měření, během kterého jsou čidla v pohybu. Zejména mobilní měření teploty vzduchu má ve výzkumu městského klimatu dlouhou tradici. Z českých (resp. československých) autorů významně přispěl k rozvoji této metody Quitt (1972) svým měřením v Brně a okolí. Na Quittův přístup navázala měření Šťastného v Košicích (Šťastný 1996), Vysoudila v Olomouci (Tomáš, Vysoudil 2010) nebo Dobrovolného opět v Brně (Dobrovolný, Krauhla 2015).

Mobilní měření je nejčastěji prováděno pomocí automobilu (Unger, Sümeghy, Zoboki 2001; Lehnert a kol. 2018). Přes nesporné výhody má využití automobilu určitá omezení – například ovlivnění měření teplem ze spalovacích motorů, zkreslení výsledků spojené s povrchem vozovky, po které se automobil pohybuje, či nepřístupnost některých lokalit pro automobil (pěší zóny, parky, úzké ulice apod.). K zajištění pohybu čidla jsou proto využívány i jiné možnosti – chůze (Tsin a kol. 2016), jízdní kolo (Melhuish, Pedder 1998) nebo dokonce tramvaj (Oncley a kol. 2009). Nově lze uvažovat o využití dronů, které však v praxi limituje legislativa.

Značný význam z hlediska studia tepelné expozice v městském prostředí mají mobilní zařízení/sestavy uzpůsobené nejen k měření teploty a případně vlhkosti

vzduchu, ale také záření a rychlosti proudění vzduchu. Na základě jejich měření je možné vypočítat tepelnou expozici pohybujícího se člověka. Operabilní zařízení pro mobilní měření tepelné expozice prezentovali např. Middel, Krayenhoff (2019) a Milošević a kol. (2022), zatím je však vývoj v této oblasti stále spíše v počátcích a reprezentativnost získaných dat je problematická.

3.3. Dálkový průzkum Země

Od 70. let (Rao 1972) a výrazněji pak od konce 80. let dvacátého století se s rostoucí dostupností snímků zemského povrchu v termální oblasti elektromagnetického spektra záření začínají ve výzkumu tepelného prostředí města šířeji uplatňovat metody dálkového průzkumu Země, zejména povrchová teplota (LST – *Land Surface Temperature*). V současnosti se povrchová teplota využívá především při studiu povrchového tepelného ostrova města (v českých městech např. Geletič, Lehnert, Dobrovolný (2016); Geletič a kol. (2019) v Brně a v Praze), méně často je její využití v klimatickém modelování při validaci robustnějších numerických modelů povrchu krajiny (LSM – *Land Surface Model*) nebo modelů povrchu budov (BSM – *Building Surface Model*; Resler a kol. 2017, 2021).

Povrchová teplota je nejčastěji studována s využitím družicových snímků. Senzory družic snímají termální snímky v atmosférických oknech v intervalech vlnových délek 3–5 μm a 8–14 μm . Mezi běžně používané patří snímky pořízené družicemi mise LANDSAT (ve střední Evropě primárně LANDSAT-5, LANDSAT-8 a od podzimu 2021 i LANDSAT-9), Terra se senzorem ASTER, SENTINEL-3, senzor ECOSTRESS na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS) nebo MODIS. Družice LANDSAT-5 snímkovala v jednom pásmu termální oblasti pomocí skeneru Thematic Mapper (TM), s výslednou scénou pořízenou v intervalu vlnových délek 10,40–12,50 μm a prostorovým rozlišením senzoru 120 m (USGS 2016). Díky misi LANDSAT-5 (snímkování v letech 1984 až 2013) je možné pracovat s dlouhou, volně dostupnou řadou výsledků. Jedním z nejvýznamnějších omezení je frekvence snímkování – 16 dnů. Významným zdrojem dat jsou v současnosti družice LANDSAT-8 a 9, jejichž senzory TIRS (Thermal Infrared Sensor) / TIRS2 snímají scény v tepelném spektru ve dvou pásmech: první má rozsah vlnových délek 10,6–11,19 μm , druhé 11,5–12,51 μm . Obě pásma jsou snímána v rozlišení 100 m, ale výsledný produkt se následně převzorkuje do prostorového rozlišení 30 m (USGS 2019). Druhou významnou nevýhodou družic LANDSAT je absence emisivity; pro její určení se používají algoritmy založené na výpočtu tzv. povrchové emisivity (*land surface emissivity*; např. Geletič, Lehnert, Dobrovolný 2016), případně se používají globální vrstvy z jiných družic; zejména se jedná o sezonní emisivitu a vegetační index NDVI z družice Terra (produkty ASTER Global Emissivity Database a ASTER Normalized Difference Vegetation Index; USGS 2022).

Významnou nevýhodu satelitních snímků představuje oblačnost. Zejména v případě povrchové teploty se jedná o limitující faktor, kdy části scény mohou být výrazně ovlivněny samotnou oblačností nebo jejími stíny, případně jinými atmosférickými aerosoly (např. kondenzační stopy letadel, kouř požárů, vytápění apod.). S rozvojem metod strojového učení a dostupným výpočetním výkonem se otevírají nové možnosti zpracování dat. Například projekt Google Earth Engine umožňuje generovat výsledky z prakticky kompletních časových řad, ze kterých byly odstraněny „vady“ (oblačnost, chyba senzorů – v případě LANDSAT-7 apod.).

Větší prostorové rozlišení povrchové teploty je možné získat leteckým snímkováním v termální části spektra (Skarbit, Gál, Unger 2015; v Česku např. Pour, Miříjovský, Purket 2019 na příkladu Olomouce). Alternativu k leteckému snímkování může představovat využití dronů (Naughton, McDonald 2019) nebo bezpilotních letadel (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*; Gaitani a kol. 2017). Významnou nevýhodou metody je mozaikování do tzv. referenčního času, protože např. změny stínění vegetace a stromů v průběhu snímkování mohou způsobit výrazné nehomogenity. Dodejme, že snímkování v termální oblasti může být realizováno i přímo ze zemského povrchu; často jsou používány ruční termální kamery, infračervené teploměry, fotoaparáty a webové kamery s filtrem pro snímání v termální oblasti. Tyto senzory bývají pevně ukotveny na objektech spojených se zemským povrchem (např. na meteorologické věži či výškové budově; Hoyano, Asano, Kanamaru 1999), na mobilním zařízení (Voogt, Oke 1998b) nebo jsou přímo obsluhováni výzkumníkem (Chui a kol. 2018; Resler a kol. 2017, 2021). Zejména v případě posledně zmíněných již však nelze v užším smyslu hovořit o metodách dálkového průzkumu Země. Podobná měření jsou dnes nicméně důležitá pro validaci (mikro) klimatických modelů (Resler a kol. 2021).

Využití metod DPZ má z hlediska výzkumu tepelného prostředí města řadu specifík a omezení, která jsou často opomíjena. Nejedná se pouze o problémy zmíněné výše, ale i o problémy spojené s měřítkem (Valenzuela, Reinke, Jones 2022). Při interpretaci získaných výsledků a formulování závěrů by měla být vždy brána v potaz např. tepelná anizotropie (zastínění trojrozměrných struktur v prostředí města), komplexnost povrchu snímků s hrubším prostorovým rozlišením, aktuální stav atmosféry (prachové částice, kouř, oblačnost) a dlouhý časový interval mezi snímky stejného místa (Voogt, Oke 1998a; Krayenhoff, Voogt 2016).

3.4. Numerické modelování

Od 60. let dvacátého století se ve výzkumu tepelného ostrova města začíná ve dle popisného přístupu prosazovat přístup analytický, který zdůrazňuje, že je nezbytné co nejdetailněji zahrnout procesy klíčové pro formování městského klimatu/mikroklimatu (Mills, Stewart, Niyogi 2022). Jedná se zejména o rozdíly

v energetické bilanci povrchů, které jsou dány specifickými radiačními procesy a souvisejícími rozdíly ve výměně tepelného záření s okolím. Všechny tyto rozdíly zároveň ovlivňují proudění vzduchu ve městě. Uvědomění si komplexity problému vedlo k dynamickému rozvoji numerického modelování městského klimatu.

Ve složitém městském prostředí je nezbytné modelovat všechny procesy související s městským mikroklimatem v prostorových měřítcích v řádech nízkých jednotek metrů. Také vzhledem k rozsahu a zaměření přehledové studie zde proto nebudeme zmiňovat regionální modely s městskou parametrizací, které mají příliš hrubé prostorové rozlišení.

Pro detailní simulace na úrovni ulic se v současnosti používají tzv. výpočtové modely dynamiky tekutin (CFD z anglického *Computational Fluid Dynamics*). Výpočtové modely dynamiky tekutin se dělí podle principu použitého pro výpočet turbulentního proudění na dvě nejpoužívanější metody: (1) Reynoldsovsky průměrované Navier-Stokesovy rovnice (RANS z anglického *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) a (2) simulace velkých vírů (LES z anglického *Large-Eddy Simulation*). Pro úplnost lze uvést, že existuje i třetí metoda, simulace vzdálených vírů (DES z anglického *Detached Eddy Simulation*), což je výpočetně mimořádně náročná kombinace obou předchozích metod. Mezi modely využívající Reynoldsovsky průměrované Navier-Stokesovy rovnice patří například modely MUKLIMO_3 (Sievers 2012, Feranec a kol. 2019), ENVI-met (Bruse 2004) nebo SOLENE-microclimate (Musy a kol. 2015), mezi modely pracující se simulacemi velkých vírů patří zejména modely PALM (Maronga a kol. 2020) nebo uDALES (Suter a kol. 2022). Pro následné využití je nezbytné vysvětlit rozdíl mezi oběma metodami; metoda Reynoldsovsky průměrovaných Navier-Stokesových rovnic využívá statistického přístupu a simuluje pouze střední hodnoty veličin s tím, že turbulence je kompletně parametrizována. Tento přístup využívá podobnosti turbulentního a chaotického molekulárního přenosu hybnosti. Problém je, že tento přístup je nepřesný a výsledky silně závisí na přesnosti parametrizace turbulentního proudění. Metody využívající simulace velkých vírů vycházejí z poznání, že hybnost, hmotu, energii a další veličiny v přízemní vrstvě atmosféry zásadně ovlivňují tzv. velké víry. Jde o prostorově a časově závislé útvary, proto je můžeme s pomocí dostatečně husté pravidelné trojrozměrné sítě explicitně modelovat a následně předvídat jejich chování. Na rozdíl od metody Reynoldsovsky průměrovaných Navier-Stokesových rovnic se tedy turbulentní víry modelují přímo, avšak jen pokud jsou dostatečně velké.

Vedle proudění musí mikroklimatický model přesně simulovat energetické procesy, které se odehrávají v městské mezní vrstvě atmosféry. Jde např. o interakce krátkovlnného slunečního záření a dlouhovlnného (tepelného) záření s povrchy ulic, s domy a se stromy, o akumulaci a uvolňování tepla zdmi budov i dalšími materiály a o energetickou bilanci budov (Krč a kol. 2021). PALM, který se stal prvním modelem metody velkých vírů se schopností detailního zachycení energetických

procesů v městském prostředí, v současné době představuje pravděpodobně nejkomplexnější městský mikroklimatický model.

Při modelování tepelného prostředí města ve vysokém prostorovém rozlišení je potřeba vycházet z předpokladu charakteristické škály heterogenit urbánní krajiny, která se obvykle pohybuje od 1 do 100 m. Modely pracující v místním a mikroklimatickém měřítku proto dosahují rozlišení, které je zpravidla výrazně vyšší (tj. podrobnější) než jeden kilometr. Detailní informace o některých vlastnostech městských povrchů spoluutvářejících tyto heterogenity (např. albedo, emisivita, tepelná kapacita a vodivost, drsnost) jsou však často nedostupné nebo vyžadují časově mimořádně náročný terénní průzkum (Resler a kol. 2021). Dnes je mezinárodní snahou data zaznamenávat a shromažďovat v rámci protokolu WUDAPT – *World Urban Database and Access Portal Tools* (Ching a kol. 2018); k přesnosti informací z této databáze pro potřeby modelování ve vysokém prostorovém rozlišení však zatím zůstáváme skeptičtí. Také numerické modely pracující ve vysokém prostorovém rozlišení proto obvykle zahrnují omezený počet příslušných faktorů a/nebo jsou některé procesy simulovány v nižším (tj. méně podrobném) rozlišení (Garuma 2018). V důsledku těchto kompromisů modely často nedokážou přesně simulovat podmínky v některých charakteristických strukturách města, např. dvory nebo uliční kaňony. V tomto smyslu je v současnosti klíčovou metodickou otázkou, zdali je při simulacích turbulencí vhodnější používat modely s plně parametrizovanou turbulencí, nebo modely s minimální parametrizací (Fröhlich, von Terzi 2008). Modelování procesů v přízemní vrstvě atmosféry ve městě je v každém případě stále náročným úkolem, kde je potřeba vždy kriticky přiznat značnou míru vědecké nejistoty.

3.5. Crowdsourcing

„Crowdsourcingem“ rozumíme postup, kdy danou činnost (sběr dat) provádí široká veřejnost (Howe 2006). Při studiu tepelného prostředí města nabývá podoby měření na (soukromých) „meteorologických“ stanicích různé kvality (Meier a kol. 2017; Rød, Maarse 2021). Chapman, Bell, Bell (2017) uvádí, že *crowdsourcing* má v tomto smyslu značný potenciál až v případě zvýšení kvality amatérských měření a zajištění jejich standardizace. Také Bell, Cornford, Bastin (2015) přes pozitivní postoj k využití *crowdsourcingu* upozorňují na často špatné umístění stanic a na chybějící kalibraci měřicích čidel. Lze proto konstatovat, že *crowdsourcing* je v oblasti měření meteorologických prvků v městském prostředí dosud založený především na kvantitě, méně však už na kvalitě získaných dat. To je v rozporu s myšlenkami prací Stewart (2011), Stewart, Oke (2012) o vývoji výzkumu městského klimatu. Takto získaná data na základě dosavadních zkušeností (nedosta- tečná kvalita měření a jeho technické dokumentace) nedoporučujeme využívat

ani pro potřeby (numerického) modelování, byť v některých případech mohou představovat alternativu k nákladným validačním kampaním. *Crowdsourcingem* však při výzkumu tepelného prostředí člověka ve městě můžeme rozumět také metody (geo)participace a některá dotazníková šetření, která jsou nezbytná pro výzkum tepelného komfortu (viz níže).

3.6. Dotazníkové šetření a participativní mapování

Koncept tepelného komfortu člověka vyžaduje nejen výzkum tepelné expozice, realizovaný výše uvedenými postupy, ale také studium složky psychologické, fyziologické a behaviorální/sociální. Výzkum těchto faktorů si žádá provedení poměrně rozsáhlých dotazníkových šetření, která se zaměřují především na aktuální subjektivní tepelný pocit, jeho vnímání, prožívání, související reakce a adaptaci člověka. Subjektivní tepelné pocity jsou posuzovány pomocí stupnice tepelných pocitů (TSV – *Thermal Sensation Vote*, tab. 2) na sedmibodové škále (ASHRAE 2017; ISO 7730:2005) nebo devítibodové škále (Matzarakis, Mayer 1996; ISO 10551:2019).

Potenciální respondenti jsou zpravidla vybírání náhodně (selektivně v případě, kdy je šetření zaměřeno na určitou skupinu osob nebo je potřeba vyvážit vzorek respondentů). Někteří autoři využívají i najatých respondentů, kteří se na zkoumaném místě zdržují delší dobu, nebo k rozšíření počtu odpovědí využívají opakovaně vyplněných dotazníků samotných tazatelů (Pearlmutter, Jiao, Garb 2014; Cohen a kol. 2019). K poslední možnosti se při kvantitativně orientovaném výzkumu stavíme kriticky.

Další údaje zjišťované v rámci dotazníkových šetření se liší podle zaměření a komplexity výzkumu. Kromě tepelných pocitů je někdy samostatně hodnocen vnímaný tepelný komfort, kdy jsou respondenti tázáni, do jaké míry dané tepelné podmínky a související tepelné pocity považují za komfortní (Hirashima, Assis, Nikolopoulou 2016). Hodnoceny mohou být rovněž tepelné preference respondentů v daný okamžik (Kántor 2016). Evidována bývá také tepelná historie respondenta, zejména doba pobytu ve venkovním prostředí předcházející rozhovoru (Krüger a kol. 2013). Především při menším vzorku respondentů může být přistoupeno i ke komplexnější psychoanalýze pocitů (Yoshida a kol. 2015).

Na základě zjištěných tepelných pocitů (TSV) zkoumané skupiny respondentů při známé tepelné expozici jsou následně založeny modely předpovědi středního tepelného pocitu (PMV – *Predicted Mean Vote*) a předpovědi procentuálního podílu nespokojených (PPD – *Predicted Percentage Dissatisfied*) (ISO 7730:2005). Zdůrazněme, že samy o sobě nejsou tyto modely příliš vhodné pro výzkum v heterogenním prostředí města během horkých dní (Kántor, Unger, Gulyás 2007; Thorsson, Lindqvist, Lindqvist 2004). Jsou však stěžejní pro objektivní stanovení

Tab. 2 – Sedmibodová škála tepelných pocitů podle ISO 7730:2005 a devítibodová škála tepelných pocitů podle ISO 10551:2019

Sedmibodová škála	Devítibodová škála
3 horko	4 velmi horko
	3 horko
2 teplo	2 teplo
1 mírné teplo	1 mírné teplo
0 neutrální	0 neutrální
-1 mírné chladno	-1 mírné chladno
-2 chladno	-2 chladno
-3 zima	-3 zima
	-4 velká zima

intervalů hodnot používaných biometeorologických indexů, jež odpovídají dané kategorii tepelného komfortu a tepelného stresu pro danou populaci.

K prostorovému vyjádření dlouhodobých zkušeností obyvatel a pravidelných návštěvníků města s tepelným prostředím se nad rámec klasických dotazníkových šetření nověji začíná využívat také mentálních map (Lenzholzer, Klemm, Vasilikou 2018). Využití mentálních map ve výzkumu tepelného prostředí města (v Česku pro Olomouc a Plzeň – Lehnert a kol. 2021a, 2023) není doposud pevně etablováno a potýká se s řadou teoreticko-metodologických problémů, jako je např. role mentálních tepelných obrazů místa ve skutečném tepelném komfortu a stresu tepelného stresu, relevance pro danou prostorovou úroveň (Lehnert a kol. 2021a) nebo ambivalentní vnímání některých míst (Brisudová, Šimáček, Šerý 2020). Teprve další studie proto ukážou vhodnost využití této metody.

4. Diskuze a závěr

Většina studií v oblasti tepelného prostředí města měla donedávna spíše charakter základního výzkumu, resp. badatelé nepředkládali dostatečně konkrétní výstupy, které by přesvědčily místní aktéry o významu poznatků (Savić a kol. 2021). V kontextu potřeb adaptace na klimatické změny se však výzkum tepelného prostředí města začal dynamicky rozvíjet. Klíčovou úlohu má nadále městská klimatologie a humánní biometeorologie spolu s fyzickou a environmentální geografii (Brazel 2017), zároveň se ale výzkum otevřel i směrem k metodám a přístupům sociálních a behaviorálních věd (tab. 3). Rozdíly mezi vědními disciplínami s odlišným vývojovým základem lze překonávat v rámci paradigmatu orientace na člověka. Pozitivistické a post-positivistické přístupy v řadě studií tak nahrazuje přístup

Tab. 3 – Metody výzkumu tepelného prostředí (člověka) ve městě, související výstupy a vědní obory

Metoda	Nejčastější výstupy	Úroveň studia*				Vybrané související vědní obory
		Mezo	Místní	Mikro	Člověk	
<i>Dálkový průzkum Země</i>						
Snímkování z družic	povrchová teplota	•	•	•	•	
Snímkování z letadel	povrchová teplota		•	•	•	
Snímkování z dronů	povrchová teplota			•	•	
<i>Měření pomocí termální kamery a infracervených teploměrů</i>						
	povrchová teplota			•	•	
<i>Stacionární měření</i>						
Stacionární stanice	teplota vzduchu a další meteorologické prvky	•	•	•	•	
Přenosné stanice	teplota vzduchu, střední radiční teplota, biometeorologické indexy		•	•	•	
<i>Mobilní měření</i>						
Čidla na dopravním prostředku**	teplota vzduchu		•	•	•	
Čidla nesená pěším vyzkumníkem	teplota vzduchu, biometeorologické indexy		•	•	•	
<i>Numerické modelování</i>						
RANS, LES	základní meteorologické prvky, střední radiční teplota, biometeorologické indexy	•	•	•	•	
<i>Crowdsourcing</i>						
Amatérská stacionární měření	teplota vzduchu, vlhkost vzduchu	•	•	•	•	
Čidla na přenosných předmětech***	teplota (vzduchu)		•	•	•	
<i>Dotazníková šetření a participativní mapování</i>						
Určení tepelného pocitu	střední tepelný pocit				•	
Mentální mapování	mentální tepelné obrazy místa		•	•	•	

Pozn.: V tabulce uvádíme pouze hlavní přístupy diskutované v článku s relevancí pro budoucí výzkum, nejedná se o vyčerpávající výčet. Výhody a limity jednotlivých přístupů jsou diskutovány v textu.

* Úroveň studia ve smyslu obr. 1 (Mezo – mezoklima, Místní – místní klima, Mikro – mikroklima, Člověk – tepelné prostředí člověka).

** Automobil, prostředky veřejné dopravy, kolo či koloběžka

*** Chytré hodinky (sporttester), mobilní telefon apod.

pragmatistický, který zohledňuje nejen empiricky naměřené hodnoty a výsledky simulací modelů, ale také kulturní a estetické faktory a informace získané od angažované veřejnosti (Creswell 2009). Tento nový přístup má při racionálním využití značný aplikační potenciál v oblastech strategického, územního či urbanistického plánování a architektury (Lenzholzer, Duchhart, Koh 2013).

Negativní stránkou dynamického vývoje výzkumu v oblasti tepelného prostředí města a člověka ve městě je rostoucí metodická nejednotnost, která může být vzhledem k narůstajícímu počtu autorů a se zahrnutím přístupů občanské vědy dále prohlubována. Řada badatelů navíc pod tíhou důrazu na rychlost publikování neprezentuje své výsledky dostatečně zasazené v kontextu současného poznání a nedostatečně komunikuje limity svého výzkumu (Stewart 2011, 2019). V důsledku, přestože výsledky výzkumu v oblasti tepelného prostředí města mají rostoucí aplikační potenciál, s koncovými uživateli (především městy) jsou mnohdy komunikovány neaktuální nebo dokonce protichůdné poznatky. Nedostatečné porozumění problematice v české praxi dobře ilustruje jeden z cílů Strategického rámce Česká republika 2030 „Snižuje se počet a velikost městských tepelných ostrovů“ (Úřad vlády České republiky 2017, s. 67). Na nepochopení nebo jen dílčí přijetí často narážíme také při šíření a prosazování současných poznatků do strategických a územněplánovacích dokumentů českých měst (např. Ostravy, Olomouce, Plzně či Prahy a jejich městských částí; viz Aubrechtová a kol. 2019).

Prezentované kritické shrnutí vychází ze světové literatury, je však zasazeno do střeoevropského prostoru a představené přístupy jsou relevantní (klimaticky, urbanisticky, popřípadě sociologicky) pro české prostředí. Tato studie tak může sloužit jako východisko pro další výzkum a projekty s aplikačním přesahem do české praxe. Analýza využití přístupů a metod využívaných municipalitami a dalšími klíčovými aktéry územního a strategického plánování na místní úrovni si vyžaduje samostatnou studii, na kterou by měly navázat vhodné aktivity pro komunikaci a výměnu zkušeností mezi zainteresovanými stranami. Z pohledu výzkumu tepelného prostředí člověka ve městě je rovněž potřeba rozvíjet studium specifik vázaných na zimní období.

Závěrem, jako klíčové pro další rozvoj studia tepelného prostředí města a člověka ve městě spatřujeme následující oblasti: (1) důkladnější poznání časoprostorové variability tepelné expozice – především vývoj numerických modelů v doménách, kde je možné řešit otázky spojené s termodynamikou městských prostor; (2) ucelení poznatků v oblasti psychofyziologické složky tepelného komfortu a (3) lepší kontrolu kvality a komunikaci limitů publikovaných výzkumů.

Literatura

- ASHRAE (2017): Thermal environmental conditions for human occupancy (ANSI/ASHRAE standard 55-2017). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta (USA).
- AUBRECHTOVÁ, T., GELETIČ, J., HALÁSOVÁ, O., LEHNERT, M., DOBROVOLNÝ, P. (2019): Administrativní reakce českých měst na adaptační procesy související s klimatickými změnami. *Urbanismus a územní rozvoj*, 22, 1, 4–12.
- BELL, S., CORNFORD, D., BASTIN, L. (2015): How good are citizen weather stations? Addressing a biased opinion. *Weather*, 70, 75–84. <https://doi.org/10.1002/wea.2316>
- BŁAŻEJCZYK, K., KUCHARCZYK, M., BŁAŻEJCZYK, A., MILEWSKI, P., SZMYD, J. (2014): Assessment of urban thermal stress by UTCI – experimental and modelling studies: an example from Poland. *Die Erde – Journal of the Geographical Society of Berlin*, 145, 1–2, 16–33.
- BOKWA, A., GELETIČ, J., LEHNERT, M., ŽUVELA-ALOISE, M., HOLLÓSI, B., GÁL, T., SKARBIT, N., DOBROVOLNÝ, P., HAJTO, M. J., KIELAR, R., WALAWENDER, J. P., ŠTASTNÝ, P., HOLEC, J., OSTAPOWICZ, K., BURIANOVÁ, J., GARAJ, M. (2019): Heat load assessment in Central European cities using an urban climate model and observational monitoring data. *Energy and Buildings*, 201, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.023>
- BRAZEL, A. J. (2017): Urban climate and physical geography: a response to Ashmore and Dodson. *The Canadian Geographer*, 61, 1, 112–116. <https://doi.org/10.1111/cag.12351>
- BRISUDOVÁ, L., ŠIMÁČEK, P., ŠERÝ, M. (2020): Mapping topo-ambivalent places for the purposes of strategic planning of urban space. The case of Šternberk, the Czech Republic. *Journal of Maps*, 16, 1, 203–209. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1844087>
- BRUSE, M. (2004): *Envi-Met 3.0: Updated Model Overview*; University of Bochum: Bochum, Germany, <http://www.envi-met.net/documents/papers/overview30.pdf> (10. 8. 2021).
- COHEN, P., SHASHUA-BAR, L., KELLER, R., GIL-AD, R., YAAKOV, Y., LUKYANOV, V., BAR, P., TANNY, J., COHEN, S., POTCHTER, O. (2019): Urban outdoor thermal perception in hot arid Beer Sheva, Israel: methodological and gender aspects. *Building and Environment*, 160, 106169. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106169>
- CRESWELL, J. W. (2009): *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3rd ed.). Sage Publications, Thousand Oaks (Kanada).
- ČSN EN ISO 9886:2004 Ergonomie – Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření.
- DOBROVOLNÝ, P., KRAHULA, L. (2015): The spatial variability of air temperature and nocturnal urban heat island intensity in the city of Brno, Czech Republic. *Moravian Geographical Reports*, 23, 3, 8–16. <https://doi.org/10.1515/mgr-2015-0013>
- DOBROVOLNÝ, P., ŘEZNÍČKOVÁ, L., BRÁZDIL, R., KRAHULA, L., ZAHRADNÍČEK, P., HRADIL, M., DOLEŽELOVÁ, M., ŠÁLEK, M., ŠTĚPÁNEK, P., ROŽNOVSKÝ, J., VALÁŠEK, H., KIRCHNER, K., KOLEJKA, J. (2012): Klima Brna. Víceúrovňová analýza městského klimatu. Masarykova univerzita, Brno.
- FERANEC, J., KOPECKÁ, M., SZATMÁRI, D., HOLEC, J., ŠTASTNÝ, P., PAZÚR, R., BOBÁLOVÁ, H. (2019): A review of studies involving the effect of land cover and land use on the urban heat island phenomenon, assessed by means of the MUKLIMO model. *Geografie*, 124, 1, 83–101. <https://doi.org/10.37040/geografie2019124010083>
- FIALA, D., HAVENITH, G., BRÖDE, P., KAMPMANN, B., JENDRITZKY, G. (2012): UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>

- FRÖHLICH, J., VON TERZI, D. (2008): Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 44, 5, 349–377. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.05.001>
- GAITANI, N., BURUD, I., THIIS, T., SANTAMOURIS, M. (2017): High-resolution spectral mapping of urban thermal properties with Unmanned Aerial Vehicles. *Building and Environment*, 121, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.027>
- GARUMA, G. F. (2018): Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. *Urban Climate*, 24, 830–851. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.006>
- 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>
- GELETIČ, J., LEHNERT, M., DOBROVOLNÝ, P., ŽUVELA-ALOISE, M. (2019): Spatial modeling of summer climate indices based on local climate zones: expected changes in the future climate of Brno, Czech Republic. *Climatic Change*, 152, 3, 487–502. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2353-5>
- GELETIČ, J., LEHNERT, M., RESLER, J., KRČ, P. (2020): Teplota ve městě: přehled používaných termínů a jejich rozdíly. *Urbanismus a územní rozvoj*, 23, 4, 17–21.
- HAVENITH, G., FIALA, D., BŁĄZEJCZYK, K., RICHARDS, M., BRÖDE, P., HOLMÉR, I., RINTAMAKI, H., BENSABAT, Y., JENDRITZKY, G. (2012): The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, 461–470. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>
- HIRASHIMA, S. Q. D. S., ASSIS, E. S. D., NIKOLOPOULOU, M. (2016): Daytime thermal comfort in urban spaces: a field study in Brazil. *Building and Environment*, 107, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.006>
- HÖPPE, P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 2, 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- HOWE, J. (2006): The rise of crowdsourcing. *Wired Magazine*, 14, 6, 1–4.
- HOYANO, A., ASANO, K., KANAMARU, T. (1999): Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography. *Atmospheric Environment*, 33, 24–25, 3941–3951. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00136-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00136-3)
- CHAPMAN, L., BELL, C., BELL, S. (2017): Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *International Journal of Climatology*, 37, 9, 3597–3605. <https://doi.org/10.1002/joc.4940>
- CHEN, L., NG, E. (2012): Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade. *Cities*, 29, 2, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>
- CHING, J., MILLS, G., BECHTEL, B., SEE, L., FEDDEMA, J., WANG, X., REN, C., BROUSSE, O., MARTILLI, A., NEOPHYTOU, M., MOUZOURIDES, P., STEWART, I., HANNA, A., NG, E., FOLEY, M., ALEXANDER, P., ALIAGA, D., NIYOGI, D., SHREEVASTAVA, A., BHALACHANDRAN, P., MASSON, V., HIDALGO, J., FUNG, J., ANDRADE, M., BAKLANOV, A., DAI, W., MILCINSKI, G., DEMUZERE, M., BRUNSELL, N., PESARESI, M., MIAO, S., MU, Q., CHEN, F., THEEUWES, N. (2018): WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 9, 1907–1924. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>
- CHLAPCOVÁ, L., URBAN, A., KYSELÝ, J. (2021): Vliv městského prostředí na tepelnou zátěž v centru Prahy. *Meteorologické zprávy*, 74, 4, 113–120.

- CHUI, A. C., GITTELSON, A., SEBASTIAN, E., STAMLER, N., GAFFIN, S. R. (2018): Urban heat islands and cooler infrastructure: measuring near-surface temperatures with hand-held infrared cameras. *Urban Climate*, 24, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.009>
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
- ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities.
- ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- ISO 10551:2019 Ergonomics of the physical environment – Subjective judgement scales for assessing physical environments.
- JENDRITZKY, G., DE DEAR, R., HAVENITH, G. (2012): UTCI – why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, 421–428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- KÁNTOR, N. (2016): Differences between the evaluation of thermal environment in shaded and sunny position. *Hungarian Geographical Bulletin*, 65, 2, 139–153. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.65.2.5>
- KÁNTOR, N., UNGER, J. (2011): The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment – the mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*, 3, 1, 90–100. <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>
- KÁNTOR, N., UNGER, J., GULYÁS, Á. (2007): Human bioclimatological evaluation with objective and subjective approaches on the thermal conditions of a square in the centre of Szeged. *Acta Climatologica et Chorologica*, 40–41, 47–58.
- KLEEREKOPER, L., VAN ESCH, M., SALCEDO, T. B. (2012): How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.004>
- KNEZ, I., THORSSON, S., ELIASSON, I., LINDBERG, F. (2009): Psychological mechanisms in outdoor place and weather assessment: towards a conceptual model. *International Journal of Biometeorology*, 53, 1, 101–111. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0194-z>
- KOVATS, R. S., HAJAT, S. (2008): Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, 29, 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>
- KRAYENHOFF, E. S., VOOGT, J. A. (2016): Daytime thermal anisotropy of urban neighbourhoods: morphological causation. *Remote Sensing*, 8, 2, 108. <https://doi.org/10.3390/rs8020108>
- KRČ, P., RESLER, J., SÜHRING, M., SCHUBERT, S., SALIM, M. H., FUKA, V. (2021): Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 14, 3095–3120. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021>
- KRKOŠKA LORENCOVÁ, E., LOUČKOVÁ, B., VAČKÁŘŮ, D. (2019): Perception of climate change risk and adaptation in the Czech Republic. *Climate*, 7, 61. <https://doi.org/10.3390/cli7050061>
- KRÜGER, E., DRACH, P., EMMANUEL, R., CORBELLA, O. (2013): Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK. *Theoretical and Applied Climatology*, 112, 1, 127–141. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0724-9>
- KŘIŠTOFOVÁ, K., LEHNERT, M., MARTINÁT, S., TOKAR, V., OPRAVIL, Z. (2022): Adaptation to climate change in the eastern regions of the Czech Republic: An analysis of the measures

- proposed by local governments. *Land Use Policy*, 114, 105949. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105949>
- LEHNERT, M., GELETIČ, J., DOBROVOLNÝ, P., JUREK, M. (2018): Temperature differences among local climate zones established by mobile measurements in two central European cities. *Climate Research*, 75(1), 53–64. <https://doi.org/10.3354/cr01508>
- LEHNERT, M., GELETIČ, J., KOPP, J., BRABEC, M., JUREK, M., PÁNEK, J. (2021a): Comparison between mental mapping and land surface temperature in two Czech cities: a new perspective on indication of locations prone to heat stress. *Building and Environment*, 203, 108090. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108090>
- LEHNERT, M., PÁNEK, J., KOPP, J., GELETIČ, J., KVĚTOŇOVÁ, V., JUREK, M. (2023): Thermal comfort in urban areas on hot summer days and its improvement through participatory mapping: A case study of two Central European cities. *Landscape and Urban Planning* 233, 104713. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104713>
- LEHNERT, M., SAVIČ, S., MILOŠEVIČ, D., DUNJIĆ, J., GELETIČ, J. (2021b): Mapping local climate zones and their applications in European urban environments: a systematic literature review and future development trends. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 4, 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040260>
- LEHNERT, M., TOKAR, V., JUREK, M., GELETIČ, J. (2021c): Summer thermal comfort in Czech cities: measured effects of blue and green features in city centres. *International Journal of Biometeorology*, 65, 1277–1289. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02010-y>
- LENZHOLZER, S., DUCHHART, I., KOH, J. (2013): ‘Research through designing’ in landscape architecture. *Landscape and Urban Planning*, 113, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.02.003>
- LENZHOLZER, S., KLEMM, W., VASILIKOU, C. (2018): Qualitative methods to explore thermo-spatial perception in outdoor urban spaces. *Urban Climate*, 23, 231–249. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.003>
- MANOLI, G., FATICHI, S., SCHLÄPFER, M., YU, K., CROWTHER, T.W., MEILI, N., BURLANDO, P., KATUL, G.G., BOU-ZEID, E. (2019): Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573 (7772), 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- MANOLI, G., FATICHI, S., SCHLÄPFER, M., YU, K., CROWTHER, T.W., MEILI, N., BURLANDO, P., KATUL, G.G., BOU-ZEID, E. (2020): “Reply to Martilli et al. (2020): Summer average urban-rural surface temperature differences do not indicate the need for urban heat reduction.” *OSF Preprints*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/mwvna>
- MARONGA, B., BANZHAF, S., BURMEISTER, C., ESCH, T., FORKEL, R., FRÖHLICH, D., FUKA, V., GEHRKE, K. F., GELETIČ, J., GIERSCH, S., GRONEMEIER, T., GROß, G., HELDENS, W., HELLSTEN, A., HOFFMANN, F., INAGAKI, A., KADASCH, E., KANANI-SÜHRING, F., KETELSEN, K., KHAN, B. A., KNIGGE, C., KNOOP, H., KRČ, P., KURPPA, M., MAAMARI, H., MATZARAKIS, A., MAUDER, M., PALLASCH, M., PAVLIK, D., PFAFFEROTT, J., RESLER, J., RISSMANN, S., RUSSO, E., SALIM, M., SCHREMPF, M., SCHWENKEL, J., SECKMEYER, G., SCHUBERT, S., SÜHRING, M., VON TILS, R., VOLLMER, L., WARD, S., WITHA, B., WURPS, H., ZEIDLER, J., RAASCH, S. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 13, 3, 1335–1372. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>
- MARTILLI, A., KRAYENHOFF, E.S., NAZARIAN, N. (2020): Is the urban heat island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100541>

- MATZARAKIS, A., MAYER, H. (1996): Another kind of environmental stress: thermal stress. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control, Newsletters, 18, 7–10.
- MATZARAKIS, A., MAYER, H., IZIOMON, M. G. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43, 2, 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- MAYER, H., HOLST, J., DOSTAL, P., IMBERY, F., SCHINDLER, D. (2008): Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 3, 241–250. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>
- MEIER, F., FENNER, D., GRASSMANN, T., OTTO, M., SCHERER, D. (2017): Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate*, 19, 170–191. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.006>
- MELHUIISH, E., PEDDER, M. (1998): Observing an urban heat island by bicycle. *Weather*, 53, 4, 121–128. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1998.tb03974.x>
- MIDDEL, A., KRAYENHOFF, E. S. (2019): Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of The Total Environment*, 687, 137–151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085>
- MILLS, G., STEWART, I. D., NIYOGI, D. (2022): The origins of modern urban climate science: reflections on ‘A numerical model of the urban heat island’. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 03091333221107212. <https://doi.org/10.1177/03091333221107212>
- MILOŠEVIĆ, D., SAVIĆ, S., ŠEĆEROV, I., DUNJIĆ, J. (2022): Introducing Mobile Micrometeorological Carts (MMCs) for urban and non-urban micrometeorological measurements. EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, EMS2022-59. <https://doi.org/10.5194/ems2022-59>
- MULLER, C. L., CHAPMAN, L., GRIMMOND, C. S. B., YOUNG, D. T., CAI, X. (2013a): Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, 33, 7, 1585–1600. <https://doi.org/10.1002/joc.3678>
- MULLER, C. L., CHAPMAN, L., GRIMMOND, C. S. B., YOUNG, D. T., CAI, X. M. (2013b): Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 8, 1161–1185. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00096.1>
- MURAKAMI, S., OOKA, R., MOCHIDA, A., YOSHIDA, S., KIM, S. (1999): CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, 1–3, 57–81. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00009-4)
- MUSY, M., MALYS, L., MORILLE, B., INARD, C. (2015): The use of SOLENE-microclimate model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Climate*, 14, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.07.004>
- NAUGHTON, J., MCDONALD, W. (2019): Evaluating the variability of urban land surface temperatures using drone observations. *Remote Sensing*, 11, 14, 1722. <https://doi.org/10.3390/rs11141722>
- NIKOLOPOULOU, M., BAKER, N., STEEMERS, K. (2001): Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70, 3, 227–235. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)
- OKE, T. R. (2002): *Boundary layer climates* (2nd Ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- OKE, T. R. (2004): Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Rep.81, WMO/TD-No. 1250. World Meteorological Organization.

- ONCLEY, S. P., SCHWENZ, K., BURNS, S. P., SUN, J., MONSON, R. K. (2009): A cable-borne tram for atmospheric measurements along transects. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 3, 462–473. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1158.1>
- OSN (2018): World urbanization prospects: the 2018 revision. <https://population.un.org/wup/> (15. 8. 2022).
- PARSONS, K. (2014): Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance (3rd Ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16750>
- PEARLMUTTER, D., JIAO, D., GARB, Y. (2014): The relationship between bioclimatic thermal stress and subjective thermal sensation in pedestrian spaces. *International Journal of Biometeorology*, 58, 10, 2111–2127. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0812-x>
- POTCHTER, O., COHEN, P., LIN, T.-P., MATZARAKIS, A. (2018): Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 631–632, 390–406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- POUR, T., MIŘIJOVSKÝ, J., PURKET, T. (2019): Airborne thermal remote sensing: the case of the city of Olomouc, Czech Republic. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup1), 209–218. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1564888>
- QUITT, E. (1972): Měřicí jízdy jako jedna z cest k racionalizaci mezoklimatického výzkumu. *Meteorologické zprávy*, 25, 6, 172–176.
- RAO, P. K. (1972): Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 647–648. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-53.7.648>
- RESLER, J., EBEN, K., GELETIČ, J., KRČ, P., ROSECKÝ, M., SÜHRING, M., BELDA, M., FUKA, V., HALENKA, T., HUSZÁR, P., KARLICKÝ, J., BENEŠOVÁ, N., ĐOUBALOVÁ, J., HONZÁKOVÁ, K., KEDER, J., NÁPRAVNÍKOVÁ, Š., VLČEK, O. (2021): Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic. *Geoscientific Model Development*, 14, 8, 4797–4842. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4797-2021>
- RESLER, J., KRČ, P., BELDA, M., JURUŠ, P., BENEŠOVÁ, N., LOPATA, J., VLČEK, O., DAMAŠKOVÁ, D., EBEN, K., DERBEK, P., MARONGA, B., AND KANANI-SÜHRING, F. (2017): PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model. *Geoscientific Model Development*, 10, 10, 3635–3659. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3635-2017>
- RØD, J. K., MAARSE, M. J. (2021): Using citizen sensing to identify heat-exposed neighbourhoods. *Urban Science*, 5, 1, 14. <https://doi.org/10.3390/urbansci5010014>
- ROSENZWEIG, C., SOLECKI, W. D., ROMERO-LANKAO, P., MEHROTRA, S., DHAKAL, S., ALI IBRAHIM, S., eds. (2018): Climate change and cities: Second assessment report of the urban climate change research network. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316563878>
- SANTAMOURIS, M., PAPANIKOLAOU, N., LIVADA, I., KORONAKIS, I., GEORGAKIS, C., ARGIRIOU, A., ASSIMAKOPOULOS, D. N. (2001): On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 70, 3, 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5)
- SAVIČ, S., MILOŠEVIČ, D., ŠEĆEROV, I., ARSENOVIĆ, D., LAZIĆ, L., DUNJIĆ, J. (2021): The role of climatological research in improving urban environments. In: 5th Serbian Congress of Geographers “Innovative approach and perspectives of the applied geography”, 9–11 September 2021, Novi Sad, Serbia, Abstract book: 15.

- SHOOSHTARIAN, S. (2019): Theoretical dimension of outdoor thermal comfort research. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101495. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101495>
- SCHMIDT, K. J., POPPENDIECK, H.-H., JENSEN, K. (2014): Effects of urban structure on plant species richness in a large European city. *Urban Ecosystems*, 17, 2, 427–444. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0319-y>
- SCHNELL, I., COHEN, P., MANDELMILCH, M., POTCHTER, O. (2021): Portable-trackable methodologies for measuring personal and place exposure to nuisances in urban environments: towards a people oriented paradigm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 86, 101589. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101589>
- SCHNELL, I., POTCHTER, O., YAAKOV, Y., EPSTEIN, Y. (2016): Human exposure to environmental health concern by types of urban environment: the case of Tel Aviv. *Environmental Pollution*, 208, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.040>
- SIEVERS, U. (2012): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Band 240, Offenbach am Main.
- SKARBIT, N., GÁL, T., UNGER, J. (2015): Airborne surface temperature differences of the different Local Climate Zones in the urban area of a medium sized city. 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), 1–4. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120497>
- STEWART, I. D. (2011): A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, 2, 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- STEWART, I. D. (2019): Why should urban heat island researchers study history? *Urban Climate*, 30, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>
- STEWART, I. D., OKE, T. R. (2012): Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 12, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- STŘEDOVÁ, H., CHUCHMA, F., ROŽNOVSKÝ, J., STŘEDA, T. (2021): Local climate zones, land surface temperature and air temperature interactions: case study of Hradec Králové, the Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 10, 704. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100704>
- SUTER, I., GRYLLS, T., SÜTZL, B. S., OWENS, S. O., WILSON, C. E., VAN REEUWIJK, M. (2022): uDALES 1.0: a large-eddy simulation model for urban environments. *Geoscientific Model Development*, 15, 5309–5335. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5309-2022>
- ŠEĆEROV, I., SAVIĆ, S., MILOŠEVIĆ, D., MARKOVIĆ, V., BAJŠANSKI, I. (2015): Development of an automated urban climate monitoring system in Novi Sad (Serbia). *Geographica Pannonica*, 19, 4, 174–183. <https://doi.org/10.5937/GeoPan1504174S>
- ŠŤASTNÝ, P. (1996): Výsledky mobilních meraní teploty a vlhkosti vzduchu v Košiciách. In: *Zborník prác SHMÚ*, 39, Slovenský hydrometeorologický ústav, 79–111.
- ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., SKALÁK, P. (2009): Data quality control and homogenization of air temperature and precipitation series in the area of the Czech Republic in the period 1961–2007. *Advances in Science and Research*, 3, 1, 23–26. <https://doi.org/10.5194/asr-3-23-2009>
- THORSSON, S., LINDQVIST, M., LINDQVIST, S. (2004): Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology*, 48, 3, 149–156. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0189-8>
- TOMÁŠ, M., VYSOUDIL, M. (2010): Mobilní měření: Prostředek při studiu prostorové variability teploty vzduchu v městské a příměstské krajině. In: *Geografie pro život ve 21. století*:

- Sborník příspěvků z XXII. sjezdu ČGS (31. 8.–3. 9. 2010). Ostrava, Ostravská univerzita v Ostravě.
- TSIN, P. K., KNUDBY, A., KRAYENHOFF, E. S., HO, H. C., BRAUER, M., HENDERSON, S. B. (2016): Microscale mobile monitoring of urban air temperature. *Urban Climate*, 18, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.001>
- UNGER, J., SÜMEGHY, Z., ZOBOKI, J. (2001): Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research*, 58, 2, 117–127. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(01\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(01)00087-4)
- URBAN, A., FONSECA-RODRÍGUEZ, O., DI NAPOLI, C., PLAVCOVÁ, E. (2022): Temporal changes of heat-attributable mortality in Prague, Czech Republic, over 1982–2019. *Urban Climate*, 44, 101197. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101197>
- Úřad vlády České republiky (2017): Strategický rámec Česká republika 2030. Příloha 1: Indikátory ke specifickým cílům strategického rámce Česká republika 2030.
- USGS (2016): Landsat – Earth observation satellites (ver. 1.2, April 2020). U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3081.
- USGS (2019): Landsat 8 (L8) Data Users Handbook (LSDS-1574, Version 5.0). <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook> (10. 9. 2022).
- USGS (2022): Landsat 8–9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. Version 4.0.
- VALENZUELA, A., REINKE, K., JONES, S. (2022): A new metric for the assessment of spatial resolution in satellite imagers. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103051. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103051>
- VANOS, J. K., RYKACZEWSKI, K., MIDDEL, A., VECCELLIO, D. J., BROWN, R. D., GILLESPIE, T. J. (2021): Improved methods for estimating mean radiant temperature in hot and sunny outdoor settings. *International Journal of Biometeorology*, 65, 6, 967–983. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02131-y>
- VOOGT, J. A., OKE, T. R. (1998a): Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 5, 895–920. <https://doi.org/10.1080/014311698215784>
- VOOGT, J. A., OKE, T. R. (1998b): Radiometric temperatures of urban canyon walls obtained from vehicle traverses. *Theoretical and Applied Climatology*, 60, 1, 199–217. <https://doi.org/10.1007/s007040050044>
- VYSOUDIL, M., FRAJER, J., GELETIČ, J., LEHNERT, M., LIPINA, P., PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, R., ŘEPKA, M. (2012): Podnebí Olomouce. Univerzita Palackého v Olomouci.
- WMO (2008): Guide to meteorological instruments and methods of observation. Seventh edition. Geneva: World Meteorological Organization.
- YOSHIDA, A., HISABAYASHI, T., KASHIHARA, K., KINOSHITA, S., HASHIDA, S. (2015): Evaluation of effect of tree canopy on thermal environment, thermal sensation, and mental state. *Urban Climate*, 14, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.004>
- ŽÁK, M., NITA, I. A., DUMITRESCU, A., CHEVAL, S. (2020): Influence of synoptic scale atmospheric circulation on the development of urban heat island in Prague and Bucharest. *Urban Climate*, 34, 100681. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100681>

SUMMARY

Traditional and novel approaches to studying the human thermal environment in urban areas: A critical review of the current state of the art

The specific thermal conditions of towns and cities are an important factor in the urban environment. Manifestations of climate change and its projections for the future require effective adaptation measures in towns and cities. The urban thermal environment, namely its human-centred aspect and corresponding theoretical and methodological concepts, has not received adequate attention in the Czech literature. The aim of this review study is to summarize and critically assess current approaches to and methods in research on the human urban thermal environment. At first, key concepts such as urban heat islands, surface urban heat islands, local climate zones, thermal exposure, thermal comfort, and heat stress are presented and discussed. The paper then focuses on the methods of current research on the human urban thermal environment, bringing a critical comparison of traditional and novel research methods in station data collection, mobile measurement, remote sensing, numerical modelling, questionnaire surveys, participative mapping, and crowdsourcing. The methods and approaches used in the current study provide various scales of spatial focus (mesoclimate, local climate, microclimate, and the human thermal environment) and a corresponding range of data outputs, which can be used to assess thermal exposure and human thermal comfort. Current advancements in research on the (human) urban thermal environment are determined by the pragmatic approach, in which theoretical and methodological differences are removed using the people-oriented paradigm. Research shall continue namely by improving the use of numerical models in domains, a tool that facilitates dealing with questions linked to thermodynamics in urban areas and also provides more comprehensive insight into the mental component of thermal comfort. A more rigorous quality control shall be applied, and limitations of the published research shall be clearly communicated. While thus far, studies and practical methodical applications have focused on the detection of urban heat island intensity, e.g., using land surface temperatures from satellite and aerial imagery in combination with operational climatological measurements, new approaches focus on the need for assessing human thermal comfort, which comprises not only an environmental component (representing thermal exposure) but also physiological, psychological, and behavioural aspects. Methods of civic science, such as questionnaire surveys and participative (mental) mapping, can be used along with the methods of human bioclimatology (detailed in situ measurements allowing for the calculation of biometeorological indices). Theoretical research studies of human thermal comfort in Czech cities should be communicated to environmental policymakers and local authorities in order to facilitate better design applications of human-oriented findings in urban planning.

Fig. 1 Spatial levels and the level of detail in the study of the (human) urban thermal environment (adapted from Murakami et al. 1999, Oke 2002).

Fig. 2 Thermal exposure (left) and thermal comfort (right).

Fig. 3 Direct and indirect influence of a location on thermal comfort (adapted from Knez et al. 2009).

Fig. 4 (a) A station of the NUNSET network - Novi Sad, Serbia (Photo: Savić 7/2014); (b) A station of the MESSO network in Olomouc (Photo: Lehnert, 6/2021); (c) Portable station AHLBORN (Photo: Lehnert 8/2021); (d) Mobile station MMC 1 (Photo: Jurek 8/2022).

PODĚKOVÁNÍ / ACKNOWLEDGEMENT

Studie byla podpořena z interního projektu Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci IGA_PrF_2023_019, Role času ve výzkumu prostředí měst a regionů: rytmicita i kontinuita.

This work was supported by the Faculty of Science, Palacký University Olomouc internal grant IGA_PrF_2023_019 – Time in urban and regional environmental research: rhythmicity and continuity.

ORCID

MICHAL LEHNERT

<https://orcid.org/0000-0001-7691-1618>

JAN GELETIČ

<https://orcid.org/0000-0002-0904-3133>

MARTIN JUREK

<https://orcid.org/0000-0001-9567-8073>