

# TEPLOTA VE MĚSTĚ

## PŘEHLED POUŽÍVANÝCH TERMÍNŮ A JEJICH ROZDÍLY

Jan Geletič, Michal Lehnert, Jaroslav Resler, Pavel Krč

*V důsledku projevů klimatické změny přibývá ve střední Evropě extrémních projevů počasí. Provedené analýzy mj. prokazatelně dokládají rostoucí počet tropických dnů, dnů s tropickou nocí [Geletič a kol., 2018] a zvyšující se frekvence a intenzita výskytu horkých vln [Kyselý, 2010; Revi a kol., 2014; Lhotka a Kyselý, 2015; Lhotka a kol., 2018]. Teplotní extrémy mají negativní dopad na životní prostředí, kvalitu života a zdravotní stav populace a vedou k náhlým nárůstům úmrtnosti v dotčených oblastech [Arsenović a kol., 2019; Urban a kol., 2019]. Mezi lokality nejvíce ohrožené vysokými teplotami patří především města, kde je koncentrace obyvatel nejvyšší a teplotní extrémy jsou navíc umocněny efektem tzv. tepelného ostrova města [Revi a kol., 2014].*

*S rostoucím uvědoměním si potřeby adaptace na probíhající klimatické změny se téma adaptace (měst) na klimatickou změnu dostává do povědomí širší (odborné) veřejnosti, médií i samotných obyvatel měst. Se zvyšujícím se zájmem o téma je bohužel spojeno také velké množství nepřesných vyjádření a mystifikací. Výjimkou nejsou termíny, které souvisejí s teplotou v městském prostředí. I přes existenci volně dostupných odborných zdrojů, např. slovník České meteorologické společnosti, často dochází k záměně pojmů, což následně vede k desinterpretaci a mystifikaci (nejen) veřejnosti. V důsledku dochází v městském prostředí např. k výběru nevhodných nebo nepřiměřeně nákladných adaptačních opatření. Cílem příspěvku je poukázat na rozdíly mezi často zaměňovanými pojmy, které s teplotou, tepelným komfortem a teplotním stresem (resp. stresem z tepla) v městském prostředí přímo souvisejí.*

### Teplota vzduchu

Teplota vzduchu je nejčastěji používanou charakteristikou při studiu teplotních poměrů ve městech. Teplota vzduchu je meteorologický prvek udávající tepelný stav ovzduší. Měří se teploměrem, který je v dobrém tepelném kontaktu se vzduchem a dokonale chráněn před přímým slunečním zářením. Podle doporučení Světové meteorologické organizace (WMO) mají být čidla teploměrů umístěna ve výšce 1,25 až 2,0 m nad zemí. Pokud je čidlo teploměru umístěno v jiné výšce, je potřeba tuto informaci slovně uvést (např. teplota přízemní je měřena ve výšce 5 cm) nebo zaznamenat v metadatech o stanici. Teplota vzduchu je obvykle měřena nad udržovaným trávníkem při absenci budov, vegetace a dalších objektů ovlivňujících reprezentativnost měření v nejbližším okolí. Při analýzách teploty vzduchu v městském prostředí jsou akceptovány i jiné povrchy, včetně jejich kombinace, které reprezentují charakter okolí a blízkost budov, případně i dalších objektů, které jsou charakteristické pro danou lokalitu, případně část města. Na základě teploty vzduchu je definován tzv. tepelný ostrov města – oblast zvýšené teploty vzduchu v mezní a přízemní vrstvě atmosféry nad městem nebo průmyslovou aglomerací ve srovnání s venkovským okolím (Slovník Čes-

ké meteorologické společnosti), resp. jeho intenzita – rozdíl teplot ve stupních Celsia (°C) nebo Kelvinech (K) mezi městem a jeho okolím. Kvalitní a reprezentativní data o prostorové variabilitě teplot v městském prostředí jsou obtížně dostupná. Teplota vzduchu současně nepostihuje všechny faktory tepelného komfortu, resp. vznikajícího teplotního stresu v městském prostředí (viz dále). Při analýze teplotních poměrů města se proto používají další (teplotní) charakteristiky, které se s teplotou vzduchu často zaměňují.

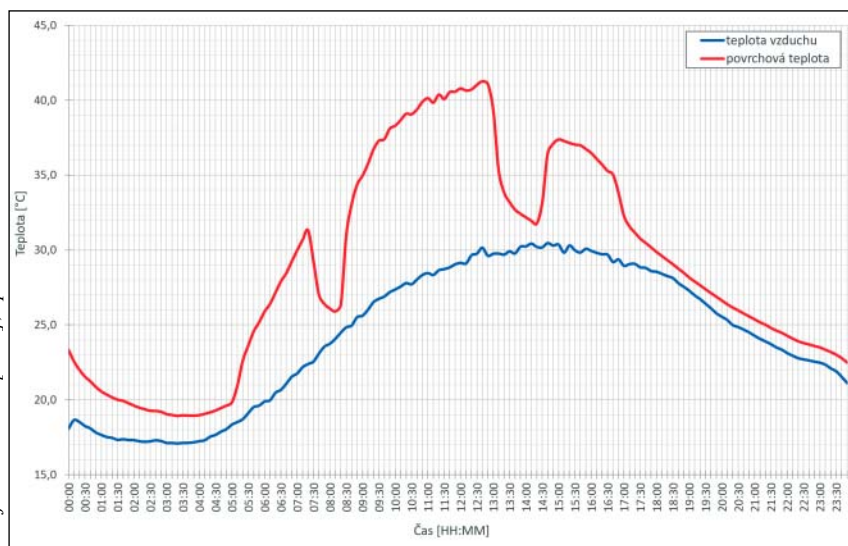
Pro zajímavost a názornost následujícího textu uvádíme naměřená rekordní absolutní teplotní maxima pro Českou republiku a Svět. Absolutní teplotní maximum naměřené v České republice má hodnotu 40,4 °C a bylo naměřeno 20. srpna 2012 v Dobřichovicích. Absolutně nejvyšší naměřené absolutní teplotní maximum na světě má hodnotu 54,0 °C. V období přístrojových měření bylo naměřeno hned dvakrát; 20. června 2013 v Údolí smrti (Kalifornie, Spojené státy americké) a 21. července 2016 v Mitribahu (Kuvajt).

### Povrchová teplota

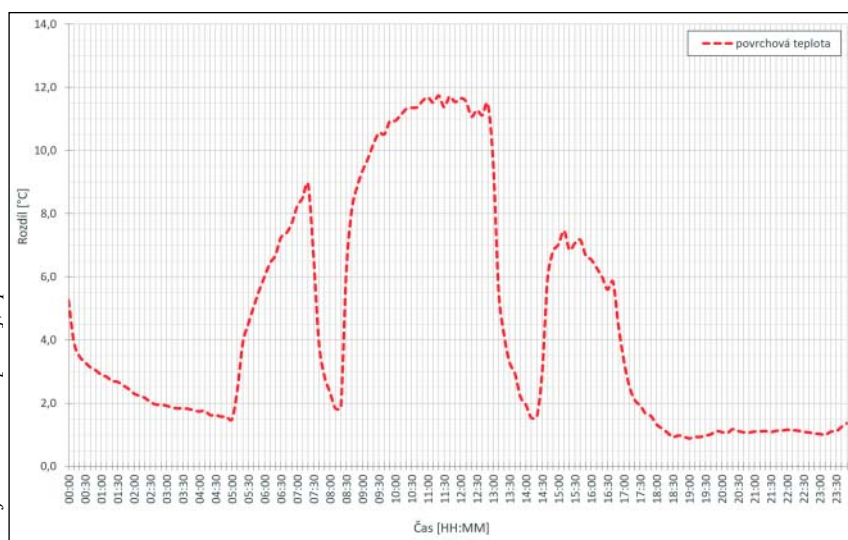
Patrně nejčastěji v praxi dochází k záměně pojmů „teplota vzduchu“ a „povrchová teplota“. Povrchová teplota je

teplota měřená na povrchu těles a stavebních konstrukcí kontaktním nebo bezkontaktním způsobem. Povrchové teploty v období maximální insolace (oslunění) mohou, například na tmavé asfaltové vozovce, přesahovat 70 °C. Naměřená povrchová teplota ve skutečnosti neodpovídá teplotě vzduchu, ale přímo teplotě povrchu vozovky. V některých případech jsou hodnoty povrchové teploty prezentovány jako teploty vzduchu (na Slunci), což je nepřesné a zavádějící.

Povrchové teploty mohou být měřeny kontaktně a bezkontaktně. Při kontaktním měření se využívá teploměr určený k měření teploty povrchu. Při bezkontaktním měření se používá infračervený teploměr, termální kamera nebo metody dálkového průzkumu Země (DPZ). Při použití termální kamery se předpokládá, že v rámci prezentovaného měření byla provedena kalibrace kamery a volba emisivity pro měřený typ povrchu, který byl homogenní. Pokud tomu tak není, může být interpretace naměřených hodnot povrchových teplot velmi nepřesná a zavádějící. Srovnání denních chodů teploty vzduchu a povrchové teploty názorně ilustruje obr. 1, rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou vzduchu reprezentuje obr. 2.



**Obr. 1: Denní chod teploty vzduchu (modrá linie) a povrchové teploty (červená) uprostřed křižovatky Dělnická a Komunardů, Praha-Holešovice, 2. 7. 2015. „Propady“ povrchové teploty jsou způsobeny zastíněním středu křižovatky okolními budovami. Namodelovaná data byla validována pomocí měření kalibrovanou termální kamerou přímo v terénu (měřil se povrch reálné ulice).**



**Obr. 2: Rozdíl v denním chodu mezi povrchovou teplotou a teplotou vzduchu uprostřed křižovatky Dělnická a Komunardů, Praha-Holešovice, 2. 7. 2015**

Velmi populární a dostupnou metodou bezkontaktního měření povrchových teplot jsou metody DPZ. Nejčastěji se využívá leteckého nebo družicového snímání. Podmínkou pro úspěšné měření je senzor pro snímání v termální části elektromagnetického spektra. Naměřená data bývají často využívána k prostorové nebo časové analýze teplotních poměrů městského prostředí. Je nezbytné zmínit důležitý fakt – doposud nebyl vymyšlen žádný univerzální vzorec pro přepočítání povrchové teploty na teplotu vzduchu. Problematice se

věnuje množství prací, z nejnovějších např. Duncan a kol. [2019], Simó a kol. [2019], Winckler a kol. [2019]. Pokud jsou prezentovány teploty vzduchu, které byly odvozeny nebo vypočteny z povrchové teploty, je vhodné brát výsledky s jistou rezervou.

V případě prezentace „teplotní mapy“ nebo „mapy s prostorovou teplotou“ získaných ze satelitních měření se často jedná o situaci totožnou s výše popsanou (viz příklad s povrchovou teplotou asfaltu). Při prezentaci družicových dat je nutné vzít v úvahu i další specifika; např. že družice a letadla snímají povrch z oblohy, tzn. z podstaty měření se jedná o povrchovou teplotu, nikoli teplotu vzduchu. Senzor snímající povrch např. „nevidí“ pod koruny stromů, pod střechy budov, pod vodní hladinu apod. Dalším specifickým problémem je prostorové rozlišení snímků. Z letadla je možné nasnímat celé město v prostorovém rozlišení desítek centimetrů nebo jednotek metrů. K tomu je zapotřebí multispektrální senzor, s jehož pomocí mohou být výsledky velmi přesné. (Zanedbáme-li fakt, že snímání obvykle trvá několik hodin, během nichž se povrchová teplota může vlivem množství slunečního záření výrazně měnit, např. stínem budov nebo stromů dopadajících na povrch ulice). Snímky ze satelitů jsou, na rozdíl od leteckého snímání, pořízeny během několika minut, což představuje pozitivum. Na druhou stranu jsou zatíženy jinou nejistotou: prostorové rozlišení typicky dosahuje jednotek stovek metrů. Např. Terra ASTER má prostorové rozlišení +/- 100 m [Sobrino a kol., 1996], LANDSAT-8 má 30 m, ale rozlišení senzoru je 100 m (jemnější měřítka vzniká použitím tzv. pan-sharpeningu; viz U.S. Geological Survey, 2016), MODIS má rozlišení +/- 1 km. V jednom pixelu je obsažena průměrná hodnota povrchové teploty pro celou povrchovou matici, např. s rozměry 100 x 100 m. Plocha pixelu může prakticky zahrnovat např. Vltavu, Karlův most a část okolní zástavby. Prakticky jde o mix povrchových teplot chodníků, střech a vodních ploch, jejichž hodnoty se běžně významně odlišují. Dá se konstatovat, že pokud je veřejnosti prezentována „mapa s prostorovou teplotou vzduchu“ s hodnotami převyšujícími 40 °C, je vhodné být obezřetný.

## **Střední radiační teplota**

O poznání složitější je situace se střední radiační teplotou (MRT; z angl. mean radiant temperature). Střední radiační teplota je rovnoměrná teplota okolních ploch, při níž se sdílí sáláním stejně tepla jako ve skutečném heterogenním prostředí. Měří se radiometry, nebo se dá

vypočítat z výsledné teploty kulového teploměru a teploty vzduchu při zohlednění proudění vzduchu (rychlosti větru).

Střední radiační teplota je ovlivněna např. tepelným zářením povrchů komunikací, chodníků, stěn budov, ale i vegetace, zejména stromů. Nejčastější způsob, jak měřit střední radiační teplotu, je kombinace černého kulového teploměru a teploty vzduchu (další, avšak poměrně nákladnou možností je využití sady pyranometrů). Teplota kulového teploměru je do jisté míry ovlivňována i okolním prouděním, které může plochu koule ochlazovat. Dá se konstatovat, že střední radiační teplota uprostřed křižovatky (viz obr. 3, bod A, modrá linie) bude vyšší než střední radiační teplota pod stromy (viz obr. 3, bod B, oranžová linie). Z obr. 3 je zřejmé, že střední radiační teplota na křižovatce je v průměru skutečně vyšší než pod stromy. Ale jak je na obr. 3 vidět, není tomu tak po celý den. Svítí-li na strom Slunce, zároveň není zastíněný okolními budovami a neumožňuje-li dostatečné proudění okolního vzduchu, mohou být

hodnoty střední radiační teploty naopak mírně vyšší. Podobná situace nastává po západu Slunce a trvá až do východu, kdy větve stromu brání radiačnímu ochlazování povrchu pod stromy oblohou v kombinaci s omezeným prouděním vzduchu. Zároveň strom vyzařuje do okolí malé množství tepelné energie, které přes den nashromáždil. Hodnoty střední radiační teploty v blízkosti stromů jsou ovlivněny i množstvím listů a větví, takže různé projevy budou charakteristické pro zimní a odlišné pro letní období. V zimním období jsou hodnoty střední radiační teploty pod listnatými stromy velmi podobné hodnotám ve středu ulice, u jehličnatých jsou rozdíly podobné těm v létě.

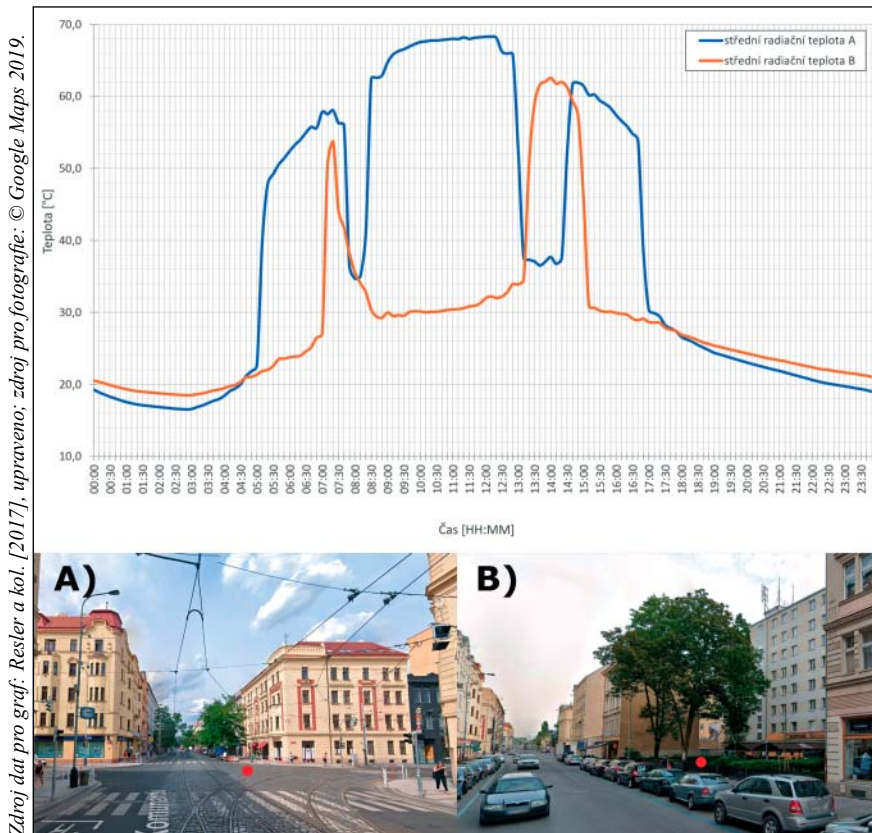
### Pocitová teplota

Dalším častým, ne však posledním, problémem bývá zaměňování pojmu „pocitová teplota“ a „teplota vzduchu“. Pocitová teplota je fiktivní teplota zahrnující vliv radiace, teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu a proudění vzduchu směřující

k vystižení subjektivního pocitu daného objektu, zpravidla člověka, v daném prostředí. Neexistuje obecně přijatý způsob jejího objektivního určení.

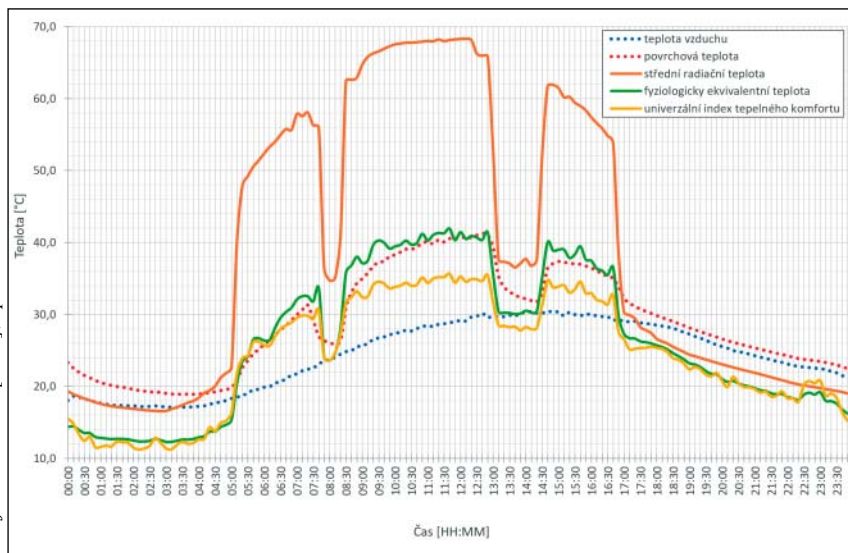
Při studiu specifických projevů městských oblastí se pocitová teplota nejčastěji vyjadřuje pomocí dvou indexů: tzv. fyziologické ekvivalentní teploty (PET; z angl. physiological equivalent temperature) a univerzálního indexu tepelného komfortu (UTCI; z angl. universal thermal climate index). Přestože se vzorce obou indexů liší, důležitým pojítkem je klíčová role střední radiační teploty (viz výše) při výpočtu pocitové teploty. Oba indexy se snaží odpovědět na otázku: „Jaký tepelný komfort by pociťoval průměrný, přiměřeně oblečený, obyvatel města na daném místě?“ Subjektivní pocitová teplota daného jedince na daném místě se od této charakteristiky tedy může odlišovat v závislosti na konkrétní činnosti, fyziologických parametrech, oblečení a psychickém rozpoložení. Na místě je vhodné použít ilustrační příklad: Kde se člověk bude během horkých letních dnů cítit nejvíce komfortně, je-li oblečen např. v plavkách? Na koupališti, v městském lesoparku nebo na náměstí? Srovnání pocitových teplot s povrchovou teplotou a teplotou vzduchu názorně ilustruje obr. 4.

Z obr. 5 vyplývá, že zaměňovat střední radiační teplotu, univerzální index tepelného komfortu nebo fyziologicky ekvivalentní teplotu s teplotou vzduchu jednoduše není možné. Rozdíly dosahují i několika desítek stupňů a mohou vést k poskytnutí významně zavádějících informací. V grafu na obr. 5 mohou všímavého čtenáře překvapit záporné hodnoty rozdílů. Otázka je nasadě: jak mohou být hodnoty střední radiační teploty, resp. univerzální index tepelného komfortu a fyziologicky ekvivalentní teplota, nižší než teplota vzduchu? Odpověď je skryta ve fyzikálních zákonech, přesněji se jedná o vyzařování tepelné energie (tzv. dlouhovlnné záření) umělými povrchy v městském prostředí do svého okolí. Tepelné záření vyzařují všechny povrchy. Různá je intenzita a délka vyzařování, která je závislá na materiálech a vlastnostech povrchů (např. na tepelné vodivosti,

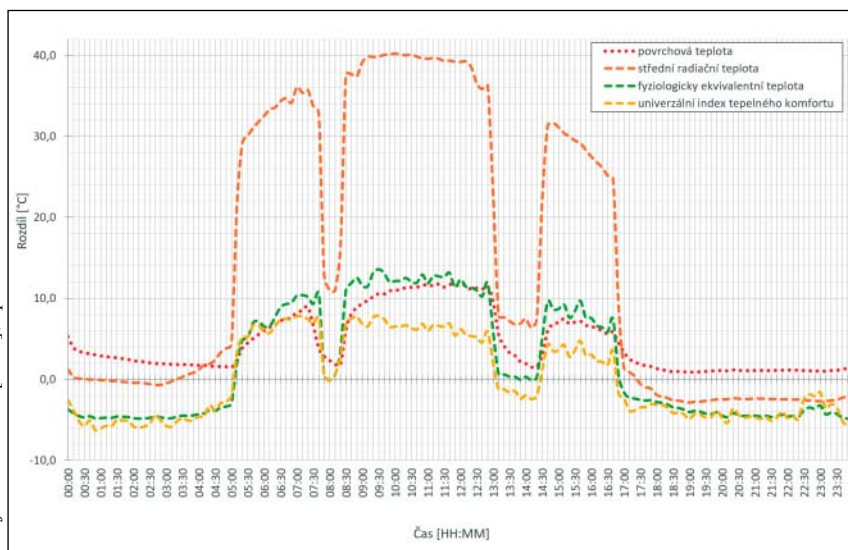


Obr. 3: Rozdíl v denním chodu mezi střední radiační teplotou uprostřed křižovatky Dělnická a Komunardů (modrá linie, A) a pod stromem na ulici Dělnická (oranžová linie, B), Praha-Holešovice, 2. 7. 2015. Červený bod znázorňuje pozici pozorovatele

Zdroj dat pro graf: Resler a kol. [2017], upraveno; zdroj pro fotografie: © Google Maps 2019.



**Obr. 4: Denní chod teploty vzduchu (modrá tečkovaná linie), povrchové teploty (červená tečkovaná linie), střední radiální teploty (oranžová linie), fyziologicky ekvivalentní teploty (zelená linie) a univerzálního indexu tepelného komfortu (žlutá linie) uprostřed křižovatky Dělnická a Komunardů, Praha-Holešovice, 2. 7. 2015**



**Obr. 5: Rozdíl v denním chodu mezi povrchovou teplotou (červená tečkovaná linie), střední radiální teplotou (oranžová linie), fyziologicky ekvivalentní teplotou (zelená linie) a univerzálním indexem tepelného komfortu (žlutá linie) a teplotou vzduchu uprostřed křižovatky Dělnická a Komunardů, Praha-Holešovice, 2. 7. 2015**

emisivité, albedu, drsnosti atd.). V noci na střed křižovatky Dělnické a Komunardů v Praze-Holešovicích Slunce nesvítí, stejně jako v době, kdy je zastíněn okolními budovami (pro 2.7.2015 přibližně od 07:45 do 08:30 a od 13:00 do 14:20). V uvedených časech povrch vyzářuje do okolí energii, kterou během dne „pohltil“; ať už přímo, ve formě přímého slunečního záření, tedy slunečních paprsků, nebo ve formě od-

raženého záření, např. od oken budov, od světlých fasád nebo od prachových částic v ovzduší.

Z obrázků vyplývá značná míra časoprostorové proměnlivosti nejen střední radiální teploty, univerzálního indexu tepelného komfortu a fyziologicky ekvivalentní teploty. Rozdíly jsou patrné např. mezi osluněnou a zastíněnou stranou ulice, pod stromem a na ne-

zastíněném chodníku, ve vnitrobloku nebo na ulici, ráno nebo večer. Hodnoty se pochopitelně liší i v závislosti na ročním období nebo meteorologických podmínkách. Je zároveň nezbytné uvést fakt, že výstupy prezentované v tomto článku jsou platné k uvedenému dni, 2. 7. 2015, a teoreticky mohou prezentovat situaci podobnou té (nikoli stejnou), která je typická pro horké vlny v Praze-Holešovicích. Jiná ulice v Praze, případně podobná ulice v jiném městě, se bude během horkých vln s vysokou pravděpodobností chovat jinak. Proto není jednoduché a vhodné zobecňovat platnost výstupů pro jiné dny, sezóny a místa.

## Závěr

Při interpretaci pojmu „teplota ve městě“ nelze zaměňovat pojmy teplota vzduchu, povrchová teplota, střední radiální teplota a pocitová teplota (obecně). Každá z uvedených charakteristik dosahuje ve městě specifických hodnot a vzájemné porovnání může být značně zavádějící. Z hlediska aplikovaného využití, např. pro potřeby urbanismu, územního plánování nebo ochrany obyvatelstva, je možné za nejvhodnější způsob vyjádření „teploty ve městě“ považovat pocitovou teplotu. Volba konkrétního indexu záleží čistě na individuálních (a technických) požadavcích zpracovatele. Problémem širšího využití jakéhokoli indexu pocitové teploty v praxi je zejména nedostupnost detailních prostorových dat a náročnost na výpočetní výkon (především pro výpočet střední radiální teploty). V posledních letech však díky rozvoji numerických modelů dochází ke značnému metodickému pokroku a v následujících letech se snad dočkáme praktického využití těchto výstupů.

## Použití zdroje:

ARSENOVIĆ, D., LEHNERT, M., FIEDOR, D., ŠIMÁČEK, P., STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T., SAVIČ, S. (2019) Heat-waves and mortality in Czech cities: A case study for the summers of 2015 and 2016. *Geographica Pannonica*, č. 23, s. 162–172. ISSN 0354-8724.

DUNCAN, J.M.A., BORUFF, B., SAUNDERS, A., SUN, Q., HURLEY, J., AMATI, M. (2019) Turning down the heat: An enhanced understanding of the relationship between urban vegetation and surface temperature at the city scale. *Science*

of *The Total Environment*, č. 656, s. 118–128. ISSN 0048-9697.

GELETIČ, J., LEHNERT, M., SAVIČ, S., MILOŠEVIČ, D. (2018) Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic. *Science of the Total Environment*, č. 624, s. 385–395. ISSN 0048-9697.

KYSELÝ, J. (2010) Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect? *International Journal of Climatology*, roč. 30, č. 1, s. 89–109. ISSN 1097-0088.

LHOTKA, O., KYSELÝ, J. (2015) Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe. *International Journal of Climatology*, č. 35, s. 1232–1244. ISSN 1097-0088.

LHOTKA, O., KYSELÝ, J., FARDA, A. (2018) Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and Applied Climatology*, č. 131, s. 1043–1054. ISSN 1434-4483.

RESLER, J., KRČ, P., BELDA, M., JURUŠ, P., BENEŠOVÁ, N., LOPATA, J., VLČEK, O., DAMAŠKOVÁ, D., EBEN, K., DERBEK, P., MARONGA, B., Kanani-Sühring, F. (2017) PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model, *Geoscientific Model Development*, č. 10, s. 3635–3659. ISSN 1991-959X.

REVI, A., SATTERTHWAIT, D.E., ARAGÓN-DURAND, F., CORFEE-MORLOT, J., KIUNSI, R.B.R., PELLING, M., ROBERTS, D.C., SOLECKI, W. (2014) Urban areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, s. 535–612. ISBN 978-1-107-41537-9.

SIMÓ G., MARTÍNEZ-VILLAGRASA D., JIMÉNEZ M.A., CASELLES V., CUXART J. (2019) Impact of the Surface–Atmosphere Variables on the Relation Between Air and Land Surface Temperatures. In: Vilibić I., Horvath K., Palau J. (eds) *Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas*. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser, Cham. ISBN 978-3-030-11958-4.

SOBRINO, J.A., LI, Z.L., STOLL, M.P., BECKER, F. (1996) Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, č. 17, s. 2089–2114.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Department of the Interior (2016) LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook (Version 2.0). U.S. Geological Survey LANDSAT Missions Web Site. Dostupné online: <https://landsat.usgs.gov/>

WINCKLER, J., REICK, C. H., LUYSSAERT, S., CESCATTI, A., STOY, P. C., LEJEUNE, Q., RADDATZ, T., CHLOND, A., HEIDKAMP, M., AND PONGRATZ, J. (2019) Different response of surface temperature and air temperature to deforestation in climate models. *Earth System Dynamics*, č. 10, s. 473–484. ISSN 2190-4979.

*Mgr. Jan Geletič, Ph.D.*

*RNDr. Jaroslav Resler, Ph.D.*

*Mgr. Pavel Krč*

*Ústav informatiky AV ČR, v. v. i.*

*Mgr. Michal Lehnert, Ph.D.*

*Ústav informatiky AV ČR, v. v. i.*

*Přírodovědecká fakulta*

*Univerzita Palackého v Olomouci*

## ENGLISH ABSTRACT

**Temperature in the city: an overview of terms and how they differ**, by Jan Geletič, Michal Lehnert, Jaroslav Resler and Pavel Krč

As a consequence of climate change, Central Europe is witnessing ever more manifestations of extreme weather. Analyses have evidenced that the number of tropical days is on the increase as well as the number of days with tropical nights. The frequency and intensity of heatwaves is also rising. Extremes of temperature have a negative impact on the environment, quality of life and health of the population, leading to a sharp increase in mortality rates. Among locations threatened by high temperatures, cities are most vulnerable because of high population density and extremes of temperature augmented by the heat island effect.

Growing awareness of the need for climate change adaptation makes this a topical issue for professionals and the media, as well as the inhabitants themselves. Unfortunately, this increased interest has brought with it a lot of imprecise information and mystification, including misuse of terms and expressions about temperature in urban settings. Although professional sources such as a glossary by the Czech Meteorological Society are freely available, many terms are used in a way that promotes confusion, which leads to misinterpretation by the public and some specialists. This can result in inappropriate choice of adaptation measures, leading to unnecessary expense. The aim of this article is to point out differences among terms relating to temperature, thermal comfort and thermal stress in urban settings.