

NOČNÁ MINIMÁLNA TEPLOTA VZDUCHU AKO KLIMATOLOGICKÝ INDIKÁTOR: NIEKTORÉ TEPLTNÉ ASPEKTY NOCÍ NA ZÁPADNOM SLOVENSKU

DALIBOR VÝBERČI¹, JOZEF PECHO^{2,3}, PAVOL FAŠKO², MILAN ONDERKA^{4,2}

¹ 941 62 Kmeťovo, daliborvyberci@protonmail.com

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

³ Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave, Mlynská dolina F1, 842 48 Bratislava

⁴ Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava

This study serves as an overview of the basic concepts of climatological assessment, brought in with use of nighttime minimum air temperature – a specific, rarely used characteristic with a sufficiently long tradition of evidence in Slovakia. According to the obtained initial outcomes, several specifics of nights within our country are demonstrated. In some calendar months, the warming of nights manifested itself differently than it is commonly documented using all-day temperature averages. Although the majority of results speak in favour of more marked increase in daily temperature maxima, nighttime minima may be locally increasing at a higher pace. Particularly strikingly expressed trends in the occurrence of longer periods of very warm nights were confirmed. In addition, there is a signal that after 1990, the overwhelming majority of the nighttime temperature stress induced since the end of the Second World War may have been accumulated.

Táto štúdia predstavuje prehľad základných konceptov klimatologického spracovania, ktoré so sebou prináša nočná minimálna teplota vzduchu – na Slovensku zriedkavo používaná špecifická teplotná charakteristika s dostatočne dlhou tradíciou evidencie. Na základe nadobudnutých iniciálnych analytických výstupov sa preukazuje niekoľko zaujímavých zvláštností nocí v rámci územia našej krajiny. V niektorých kalendárnych mesiacoch sa otepľovanie nocí prejavilo odlišne, než je dokumentované bežne na základe celodenných priemerov teploty. Hoci výsledky pre väčšinu staníc hovoria v prospech výraznejšieho rastu denných teplotných maxim, lokálne sa u nás v rýchlejšom tempe môžu zvyšovať nočné minima. Potvrdzujú sa obzvlášť nápadne vyjadrené trendy vo výskyte súvislých dlhších období veľmi teplých nocí, a popritom sa objavuje signál, že v období po roku 1990 sa mohla nahromadiť nesmierne veľká časť nočného teplotného stresu, vyindukovaného od konca druhej svetovej vojny.

Key words: nighttime minimum temperature, nighttime warming, nighttime warm spells, climate change, Western Slovakia, Hurbanovo

ÚVOD

V programe klimatologických pozorovaní na meteorologických stanicích na Slovensku (obdobne aj v Česku), a teda v rámci príslušnej evidencie z nich, je časový úsek medzi večerným (o 21. h stredného miestneho slnečného času [SMČ]) a ranným (o 7. h SMČ) klimatologickým termínom pozorovaní považovaný za nočný (nokturnálny) čas, t. j. „(klimatologickú) noc“ (Slabá, 1976; Sobišek, 1993). *Nočná minimálna teplota vzduchu*, čiže najnižšia dosiahnutá hodnota teploty vo výške 2 m nad zemským povrchom od večerného do ranného termínu merania vrátane, je v odbornej sfére popri prízemnej minimálnej teplote vzduchu asi najčastejšie, hoci stále pomerne ojedinele využívanou nočnou charakteristikou.

Zaznamenávanie nočnej minimálnej teploty vzduchu nie je medzinárodne obligatórnym, no v (česko)slovenskej praxi má dlhú tradíciu. Štandardizovaná evidencia tejto charakteristiky sa na niektorých najvýznamnejších stanicích vyššieho rádu (profesionálnych, synoptických, leteckých, vojenských) objavuje už počas medzivojnového obdobia 1. Československej republiky v staničných denných záznamníkoch (tzv. veľkých denníkoch). Postupne sa príslušná denníková evidencia rozšírila prakticky na všetky stanice

uvedeného druhu. Od roku 1971 bola nočná minimálna teplota začlenená aj do mesačných výkazov meteorologických pozorovaní, súc tam vykazovaná ako minimálna teplota o 7. h SMČ, a takto evidovaná už celosieťovo zo všetkých klimatologických staníc. V súčasnosti v prípade staníc, na ktorých je zabezpečené už iba automatické meranie teploty, sa nočná minimálna teplota v klimatologickej evidencii už špecificky nenachádza, avšak možno ju náležite určiť z dostupných podrobných (minútových) údajov z týchto staníc. Dodajme, že nočnú minimálnu teplotu nachádzame aj medzi operatívnymi údajmi v národnom spravodajstve INTER (denné spravodajstvo z klimatologických pozorovaní) existujúcom asi od polovice 20. storočia. Počet tzv. interových staníc sa v priebehu času postupne zvyšoval, a to aj o dobrovoľnícke klimatologické stanice, avšak po komplexnej automatizácii dobrovoľníckych staníc sa znovu zredukoval na stanice, na ktorých je naďalej zachované aj analógové meranie, čo sú momentálne takmer výlučne len profesionálne (synoptické) stanice.

V jednotlivých primárnych údajových zdrojoch sa nočná minimálna teplota vzduchu vyskytuje pod rôznymi skratkami, napr. *Tmin7*, *Tmin_noc*, alebo *Tnn*. Definitívne hodnoty charakteristiky sú obsiahnuté v meteorologických

výkazoch, resp. denníkoch. V digitálnej forme sa údaje o nočnej minimálnej teplote dlhodobo a systematicky neevídujú ako riadna, revízií podliehajúca súčasť ústrednej klimatologickej databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ; viď aj Krška a Racko, 1993). Dohľadateľné údaje v elektronickej podobe v doplnkovej evidencii zo spravodajstva INTER (od roku 1998) majú, ako sme už spomenuli, len charakter operatívnych údajov.

Význam nočnej teploty spočíva predovšetkým v umocňovaní tepelnej záťaže na organizmus človeka pri výskyte nocí s veľmi vysokými, u nás typicky tropickými minimami, teda v najteplejšej časti roka. Takouto nocou zapríčinené obmedzenie regeneračnej schopnosti ľudského tela bežne vedie k prerušovaniu a skracovaniu spánku, až nespavosti a v najzávažnejších prípadoch vyúsťuje až v letálne dôsledky, pričom v súčasnej rýchlo sa otepľujúcej klíme sa tieto riziká amplifikujú (napr. Obradovich a kol., 2017; Royé a kol., 2021; Minor a kol., 2022; Altena a kol., 2023; Rippstein a kol., 2023). V biometeorologickom kontexte navyše nové dôležité skutočnosti nedávno publikovali Hass a kol. (2022), podľa zistení ktorých najvyššie hodnoty teplôt a komplexných tepelných charakteristík (indexov), ktoré ľudia reálne zažívajú (zohľadňujúc ich aktivitu v priebehu dňa), sú vo všeobecnosti často pozorované neskôr večer, zatiaľ čo najnižšie sa bežne vyskytujú nie v noci, ale v priebehu dennej doby. Vaghefi a kol. (2022) vo svojich výstupoch dokumentujú, že s ohľadom na budúci vývoj podmienok by mali byť prioritizované adaptačné mechanizmy zamerané na zvýšenie toleranciu práve voči nočným teplotám.

Napriek kľúčovému potenciálnemu uplatneniu v oblasti humánnej biometeorológie má nočná minimálna teplota vzduchu svoje opodstatnené miesto v odbornej sfére aj v tradičnej klimatológii. Na Slovensku bola táto teplotná charakteristika zatiaľ využitá v hodnoteniach tzv. letných a tropických nocí (Lapin a kol., 2016; Babin a kol., 2021). Nočná minimálna teplota ale tiež poskytuje vhodnú možnosť na analýzu efektu nočného otepľovania, optimálne aj s jeho následným porovnaním s otepľovaním dennej doby, a teda stanovení ich čiastkového podielu na celkovom oteplení klímy (koncept diurnálnej asymetrie otepľovania; napr. Davy a kol., 2017). Súvisiacim námetom môže byť hodnotenie nočných, resp. združených nočnodenných teplých vln, keďže v dosiaľ publikovanej literatúre nesporne prevláda, ba až dominuje denný typ teplých vln, resp. vln horúčav, analyzovaných na základe teplotných maxim. Napríklad Wu a kol. (2023) však najnovšie upozorňujú na výraznejší nárast frekvencie a zastúpenia v priebehu roka práve pri nočných a kombinovaných teplých vlnách v porovnaní s dennými. Tomu by mohlo zodpovedať aj obzvlášť nápadné pribúdanie súvislých periód tropických nocí, ktoré sme konštatovali v našej prvej štúdií s využitím nočnej minimálnej teploty (Babin a kol., 2021).

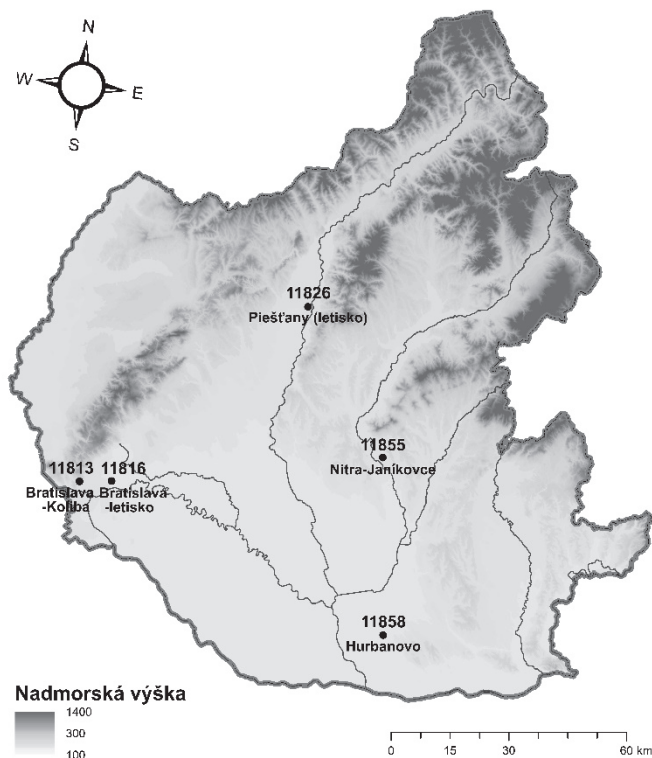
V tomto príspevku sa z perspektívy tradičnej klimatológie zameriavame na spomenuté teplotné aspekty nocí podľa nočnej minimálnej teploty vzduchu vo výberovom súbore piatich popredných klimatologických staníc v oblasti západného Slovenska. Jednotlivé sledované aspekty postupne uvádzame a vyhodnocujeme v metodologickej, resp. výsledkovej časti práce. Štúdia je zároveň akýmsi predstavením príležitostí, ktoré charakteristika „nočná minimálna teplota vzduchu“ ponúka; tento prístup a konkrétne spracované témy na Slovensku doposiaľ v odborných publikáciách absentovali.

POUŽITÝ MATERIÁL A METODIKA SPRACOVANIA

Pre analytickú časť práce boli spracované údaje o teplote vzduchu z klimatologických meraní na piatich profesionálnych meteorologických staniách SHMÚ (Obr. 1): z Hurbanova za obdobie rokov 1946 – marec 2023, z Bratislavy-Kolíby, Bratislavy-letiska a Piešťan (letisko) za obdobie 1971 – 2020 a z Nitra-Janíkoviec za obdobie 1982 – 2020. Na všetkých týchto staniách je dlhodobo až do súčasnosti klimatologické meranie realizované tradičným/konvenčným spôsobom na analógových teplomerach v meteorologickej búde, ktoré tak aj po automatizácii má v kontexte príslušnej evidencie prednosť pred automatickým meraním. Časové rady zo všetkých uvedených staníc spĺňajú prísnejšie kritéria homogenity a kompletnosti príslušných údajov.

Obrázok 1. Poloha záujmových klimatologických staníc v rámci oblasti západného Slovenska. Číslo predstavuje staničný indikatív WMO.

Figure 1. Location of used climatological stations within the territory of Western Slovakia. WMO stations identifiers are indicated.



Primárnu analyzovanú meteorologickú charakteristiku predstavovala nočná minimálna teplota vzduchu (jej bližší popis je v úvodnej kapitole). Formálne poznamenávame, že nočná minimálna teplota priradená dňu d v oficiálnej evidencii označuje minimum dosiahnuté v noci medzi večerným termínom predchádzajúceho kalendárneho dňa $d-1$ a daného dňa d , teda napr. nočná minimálna teplota pre 15. júl je nameraná v noci zo 14. na 15. júla. Zo zásady vždy platí, že hodnota nočnej minimálnej teploty nemôže byť vyššia ako okamžitá suchá teplota v priliehajúcom večernom klimatologickom termíne merania (o 21. h SMČ; začiatok noci), nemôže byť vyššia ako okamžitá suchá teplota v priliehajúcom rannom klimatologickom termíne (o 7. h SMČ; koniec noci), a súčasne nemôže byť nižšia ako minimálna celodenná teplota vzduchu.

Údaje o nočnej minimálnej teplote vzduchu boli prevzaté/zdigitalizované zo štandardných mesačných meteorologických výkazov (k dispozícii od roku 1971), prípadne aj z meteorologických denníkov (spred roku 1971) v archíve SHMÚ v Bratislave-Kolibe a v staničnom archíve meteorologického observatória SHMÚ v Hurbanove. Všetky hodnoty boli skontrolované a prípadné sporné hodnoty boli expertne posudzované a ustálené; celý tento proces bol realizovaný s využitím, resp. za pomoci termínových hodnôt teploty vzduchu vo večernom a rannom klimatologickom termíne, minimálnej celodennej teploty vzduchu, prízemnej minimálnej teploty vzduchu, operatívnych údajov o nočnej minimálnej teplote zo spravodajstva INTER, vyčíslení termografických pásov, paralelných údajov z automatického merania, denníkových údajov, a/alebo operatívnych údajov o minimálnej teplote z medzinárodného spravodajstva SYNOP.

Analytické spracovanie iných údajov okrem nočnej minimálnej teploty vzduchu bolo uskutočnené so zreteľom na konkrétny hodnotený aspekt, vid' nasledujúci metodický popis jednotlivých čiastkových analýz.

Trendová analýza nočnej minimálnej teploty vzduchu a analýza efektu nočného otepľovania

Z denných hodnôt nočnej minimálnej teploty vzduchu boli štandardizovaným postupom vypočítané mesačné, a následne z nich sezónne a ročné priemery. Rovnakým spôsobom boli pre potreby komparatívneho hodnotenia spracované priemery ďalších teplotných meteorologických charakteristík: večernej termínovej teploty vzduchu, ranej termínovej teploty vzduchu, maximálnej (celo)dennej teploty vzduchu a minimálnej (celo)dennej teploty vzduchu.

V prípade večernej termínovej teploty vzduchu, ktorá je údajom na rozhraní dvoch klimatologických dní ako celkov (špecifickejšie dennej doby „starého“ dňa a noci nového dňa), bol údaj vzhľadom k zameraniu práce hodnotený v kontexte noci; preto údaj z večerného klimatologického termínu posledného kalendárneho dňa v mesiaci bol analyzovaný ako už náležiaci prvému dňu nového mesiaca.

Dlhodobý vývoj ročných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu a uvedených porovnávaných charakteristík bol vyhodnotený pre všetkých päť záujmových staníc, v prípade jednotlivých sezón a mesiacov bola analýza

uskutočnená pre najdlhší pripravený časový rad z meteorologického observatória Hurbanovo.

Analýza nočných teplých vln

Nočné teplé vlny boli identifikované ako sled silne nadnormálnych hodnôt nočnej minimálnej teploty vzduchu. Analogicky k našej skoršej súbornej práci s príbuznou tematikou (Výberčí a kol., 2018b) bola za nočnú teplú vlnu považovaná séria aspoň 5 za sebou idúcich dní s kladnou odchýlkou nočnej minimálnej teploty od hodnoty 90. percentilu jej empirickej distribúcie pre daný deň v roku z obdobia 1961–1990, pričom hodnoty denných percentilov boli zhladené 5-dňovými centrovanými klzavými priemermi. Referenčné normálové obdobie 1961–1990 bolo zvolené v súlade s príslušnou smernicou Svetovej meteorologickej organizácie (WMO, 2017), nakoľko predmetom hodnotenia bol dlhodobý vývoj klimatických podmienok s poukázaním na potenciálne prejavy klimatickej zmeny.

Nočné teplé vlny boli identifikované v rámci celého roka (január až december). Hodnotené bolo a) trvanie vln; b) intenzita vln – určená veľkosťou denných odchýlok nad prahovou hodnotou, dosiahnutie ktorej je potrebné na klasifikáciu vln podľa uvedenej definície; c) (meteorologická) závažnosť vln – kombinovaný ukazovateľ trvania a priemernej intenzity každej vlny, t.j. jej sumárna intenzita.

Táto analýza bola uskutočnená pre najdlhší pripravený časový rad z meteorologického observatória Hurbanovo, zahrňujúci celé uvedené normálové obdobie.

VÝSLEDKY

Trendy nočnej minimálnej teploty vzduchu a nočné otepľovanie

Spomedzi päťice analyzovaných lokalít bolo najväčšie tempo zvyšovania ročných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu zaznamenané na bratislavskom letisku (0,44 °C/10 rokov) a len nepatrne nižšie v Bratislave-Kolibe a Nitre-Janíkovciach. V Piešťanoch bola zistená rýchlosť nárastu o čosi menšia, stále však štatisticky veľmi významná až na hladine významnosti 99,9% (Tab. 1).

Večerná termínová teplota vzduchu na začiatku noci dlhodobo vzrástla v zásade v podobnej miere než ranná na konci noci na všetkých sledovaných staniaciach s výnimkou Nítry-Janíkoviec, kde bolo zaregistrované nápadnejšie tempo rastu teploty v rannom termíne v porovnaní s večerným.

Ak porovnáme dlhodobý vývoj hodnôt nočnej minimálnej teploty vzduchu s celodennými teplotnými minimami, na každej zo staníc bol rozdiel v tempách príslušných rastúcich trendov v podstate zanedbateľný.

Zaujímavejšia je komparácia tendencie rastu nočných teplotných miním a maximálnej dennej teploty vzduchu. Na štyroch z piatich staníc sa maximá v priebehu času zvýšili vo vyššom až výrazne vyššom tempe; najmarkantnejšie v Piešťanoch a Nitre-Janíkovciach. Na poslednej hodnotenej stanici Bratislava-letisko však bola situácia celkom opačná a výraznejšie tam vzrástli nočné minimá, pričom v nápadne väčšej miere v porovnaní s dennými maximami.

Tabuľka 1. Hodnoty vybraných štatistických ukazovateľov lineárnej regresnej analýzy ročných priemerov vybraných charakteristík teploty vzduchu.

Table 1. Values of selected statistical parameters from the linear regression analysis of selected air temperature characteristics' yearly averages. The characteristics in columns from left: nighttime minimum temperature, evening temperature at the climatological measurement at 21 hrs local mean solar time [LMT], morning temperature at the climatological measurement at 7 hrs LMT, all-day minimum temperature, daily (all-day) maximum temperature.

stanica	obdobie	nočná minimálna teplota	večerná teplota o 21. h SMČ	ranná teplota o 7. h SMČ	minimálna (celo)denná teplota	maximálna denná teplota
Hurbanovo	1946–2022	0,0263 °C/rok intercept: 4,93 °C R ² = 0,4681 p < 0,001	0,0260 °C/rok intercept: 8,50 °C R ² = 0,4192 p < 0,001	0,0232 °C/rok intercept: 7,23 °C R ² = 0,3951 p < 0,001	0,0265 °C/rok intercept: 4,64 °C R ² = 0,4769 p < 0,001	0,0297 °C/rok intercept: 14,69 °C R ² = 0,4000 p < 0,001
Hurbanovo	1971–2020	0,0376 °C/rok intercept: 5,28 °C R ² = 0,4643 p < 0,001	0,0438 °C/rok intercept: 8,62 °C R ² = 0,5009 p < 0,001	0,0414 °C/rok intercept: 7,27 °C R ² = 0,516 p < 0,001	0,0371 °C/rok intercept: 5,02 °C R ² = 0,4658 p < 0,001	0,0528 °C/rok intercept: 14,71 °C R ² = 0,5202 p < 0,001
Bratislava-Koliba	1971–2020	0,0405 °C/rok intercept: 5,72 °C R ² = 0,5315 p < 0,001	0,0429 °C/rok intercept: 8,58 °C R ² = 0,4996 p < 0,001	0,0419 °C/rok intercept: 7,00 °C R ² = 0,5090 p < 0,001	0,0407 °C/rok intercept: 5,46 °C R ² = 0,5458 p < 0,001	0,0510 °C/rok intercept: 13,40 °C R ² = 0,4798 p < 0,001
Bratislava-letisko	1971–2020	0,0445 °C/rok intercept: 5,30 °C R ² = 0,6073 p < 0,001	0,0565 °C/rok intercept: 8,41 °C R ² = 0,6670 p < 0,001	0,0555 °C/rok intercept: 7,06 °C R ² = 0,6588 p < 0,001	0,0445 °C/rok intercept: 5,04 °C R ² = 0,5896 p < 0,001	0,0377 °C/rok intercept: 14,59 °C R ² = 0,3269 p < 0,001
Piešťany	1971–2020	0,0277 °C/rok intercept: 4,69 °C R ² = 0,3056 p < 0,001	0,0404 °C/rok intercept: 8,03 °C R ² = 0,4594 p < 0,001	0,0445 °C/rok intercept: 6,33 °C R ² = 0,5136 p < 0,001	0,0268 °C/rok intercept: 4,36 °C R ² = 0,2898 p < 0,001	0,0469 °C/rok intercept: 13,84 °C R ² = 0,4597 p < 0,001
Nitra-Janíkovce	1982–2020	0,0404 °C/rok intercept: 4,94 °C R ² = 0,4061 p < 0,001	0,0524 °C/rok intercept: 8,46 °C R ² = 0,4982 p < 0,001	0,0628 °C/rok intercept: 7,04 °C R ² = 0,6158 p < 0,001	0,0425 °C/rok intercept: 4,59 °C R ² = 0,4173 p < 0,001	0,0605 °C/rok intercept: 14,41 °C R ² = 0,4631 p < 0,001

Tabuľka 2. Hodnoty vybraných štatistických ukazovateľov lineárnej regresnej analýzy mesačných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu v Hurbanove za obdobie 1946–2022.

Table 2. Values of selected statistical parameters from the linear regression analysis of nighttime minimum temperature monthly averages in Hurbanovo, 1946–2022.

ukazovateľ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
°C/rok	0,0397	0,0383	0,0206	0,0121	0,0206	0,0305	0,0324	0,0398	0,0192	0,0323	0,0135	0,0167
intercept [°C]	-4,99	-3,67	0,27	5,01	9,26	12,22	13,52	12,76	9,90	4,86	2,05	-2,00
R ²	0,0999	0,0721	0,0611	0,0327	0,1138	0,2614	0,3110	0,4375	0,1021	0,1508	0,0235	0,0296
p	< 0,01	< 0,05	< 0,05	0,1155	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,01	< 0,001	0,1829	0,1346

Tabuľka 3. Hodnoty vybraných štatistických ukazovateľov lineárnej regresnej analýzy sezónnych priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu v Hurbanove za obdobie 1946–2022 (pre zimu a chladný polrok 1946/1947–2022/2023).

Table 3. Values of selected statistical parameters from the linear regression analysis of nighttime minimum temperature seasonal averages in Hurbanovo, 1946–2022 (for winter and cold halfyear: 1946/1947–2022/2023).

ukazovateľ	jar III–V	leto VI–VIII	jeseň IX–XI	zima XII–II	teplý polrok IV–IX	chladný polrok X–III
°C/rok	0,0179	0,0344	0,0219	0,0332	0,0257	0,0282
intercept [°C]	4,84	12,83	5,59	-3,58	10,45	-0,61
R ²	0,1619	0,5380	0,1718	0,1431	0,4805	0,2384
p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Na základe mesačných priemerov zo 77 rokov dlhého časového radu z Hurbanova dochádza k najmarkantnejšiemu zvyšovaniu nočnej minimálnej teploty v januári a februári, v letných mesiacoch a októbri (Tab. 2). V januári a auguste bolo tempo otepľovania spomedzi individuálnych kalendárnych mesiacov najvyššie: 0,40 °C/10 rokov. Menej výrazne, ale štatisticky významne na hladine aspoň 95 %, sa z pohľadu nočných miním oteplili marec, máj a september.

Naopak, v apríli, novembri a decembri je rastúci trend najmenej výrazný a štatisticky nevýznamný.

Sezónne priemery nočnej minimálnej teploty vzduchu sa v prípade analyzovaného hurbanovského radu zvýšili vo všetkých hodnotených častiach roka so štatistickou významnosťou na hladine 99,9 % (Tab. 3). Najrýchlejší trend bol pritom zaznamenaný v prípade leta a zimy (0,34 resp. 0,33 °C/10 rokov).

Nočné teplé vlny v Hurbanove

Podľa použitej metodiky bolo v Hurbanove v rokoch 1946–2022 identifikovaných spolu 127 nočných teplých vln so sumárnym trvaním 811 dní. V Tab. 4 sú prezentované vybrané základné ukazovatele výskytu, rozdelené/agregované do dvoch kontextuálnych období za účelom charakterizácie prejavov klimatickej zmeny.

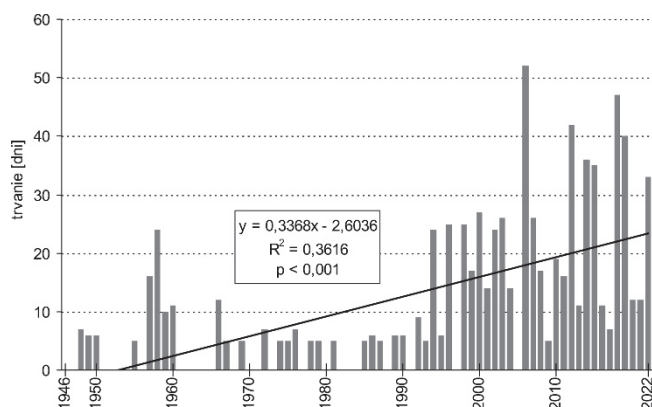
Tabuľka 4. Hodnoty vybraných ukazovateľov výskytu nočných teplých vln v Hurbanove v dvoch vybraných periódach rokov v rámci obdobia 1946–2022.

Table 4. Values of selected indicators of nighttime warm spells occurrence in Hurbanovo in two selected time periods within 1946–2022. Indicators in rows from top: number of spells, average duration in days, total duration, duration of the longest spell, average intensity (sum of daily temperature deviations above 1961–1990 normal), severity i.e. total intensity, most severe spell. In the lower part of the table, the values for spells with onset in the summer months are only shown.

sezóna	ukazovateľ nočných teplých vln	1946 – 1990 (45 rokov = 58,4% celého obdobia)	1991 – 2022 (32 rokov = 41,6%)
všetky vlny (celoročne)	počet vln	31 (24,4%)	96 (75,6%)
	priemerné trvanie vlny	5,6 dňa	6,6 dňa
	sumárne trvanie vln	174 dní (21,5%)	637 dní (78,5%)
	trvanie najdlhšej vlny	7 dní	16 dní
	priemerná intenzita vlny	12,1 °C	15,0 °C
	závažnosť (= sumárna intenzita) vln	373,9 °C (20,6%)	1438,5 °C (79,4%)
	najzávažnejšia vlna	31,5 °C	47,1 °C
iba vlny so začiatkom v letných mesiacoch	počet vln	6 (12,8%)	41 (87,2%)
	priemerné trvanie vlny	5,5 dňa	7,0 dňa
	sumárne trvanie vln	33 dní (10,3%)	286 dní (89,7%)
	priemerná intenzita vlny	11,0 °C	14,2 °C
	závažnosť (=sumárna intenzita) vln	66,3 °C (10,2%)	580,6 °C (89,8%)

Obrázok 2. Ročné trvanie, t.j. počet dní v rámci nočných teplých vln v Hurbanove v období 1946–2022. Čiarou je naznačený odhad lineárneho trendu.

Figure 2. Annual duration, i.e. count of days within the nighttime warm spells in Hurbanovo, 1946–2022. The line indicates the respective linear trend.



Až do roku 1990 vrátane sa v Hurbanove vyskytovali len nočné teplé vlny s trvaním najviac 7 dní, avšak následne až do konca roku 2022 bolo zaregistrovaných až 21 prípadov dlhších, teda aspoň 8-dňových vln, z toho dokonca 10 vln s dĺžkou najmenej 10 dní. Absolútne najdlhšie zaznamenané trvanie nočnej teplej vlny 16 dní bolo dosiahnuté v prípade dvoch vln, ktoré sa obe vyskytli v rovnakom roku – 2006. Vzhľadom k uvedenému tak sumárne ročné trvanie vln (Obr. 2) neprekvapivo vykazuje jednoznačný významný štatistický trend. V tomto kontexte je pritom tiež pozoruhodné, že až do približne polovice 90. rokov 20. storočia boli len zriedkavé prípady viac než jednej vlny v priebehu roka. Odvtedy sa to však stalo celkom normálnym javom, a v najexponovanejších rokoch sa vyskytlo až 6 individuálnych nočných teplých vln.

Konformne k zvýšeniu početnosti a predĺžovaniu nočných teplých vln došlo aj k ich intenzifikácii, ergo nárastu ich meteorologickej závažnosti (Tab. 4). Úplne najzávažnejšia nočná teplá vlna sa v Hurbanove vyskytla v priebehu leta 2012.

Dosiahnuté výsledky sa ukázali ako obzvlášť pozoruhodné v letnom období – vo všeobecnosti najdôležitejšej časti roka z pohľadu dôsledkov nočných teplých vln. Rozdiel medzi uvažovanými obdobiami pred, resp. od nástupu výraznejších prejavov klimatickej zmeny, bol pre letnú sezónu pri všetkých parametroch vln ešte markantnejší (Tab. 4). Zrejme najpodstatnejšou zistenou skutočnosťou pritom je, že bezmála 90 % celkového trvania a sumárnej intenzity/závažnosti letných nočných teplých vln v Hurbanove sa vyskytlo od roku 1991.

DISKUSIA A ZÁVERY

V tejto štúdiu nebolo našim zámerom opätovne poukazovať na otepľujúci sa trend ako-taký, ktorý bol na Slovensku v ére rýchlo postupujúcej klimatickej zmeny dostatočne často a komplexne dokumentovaný (napr. Labudová a kol., 2015; Faško a kol., 2022). V rámci trendovej analýzy sme sa sústredili hlavne na identifikáciu prípadných nápadných odlišností a špecifik nocí v nastúpenom procese otepľovania. Rozdiely sa ukázali napr. v prípade analýzy mesačných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu, uskutočnenej na príklade Hurbanova, a to pre mesiace apríl – otepľujúci sa trend vyjadrený menej výrazne než pri priemernej teplote, september a október – výraznejšie vyjadrený trend.

Výsledky komparatívnej analýzy dokladajú, že denné maximá teploty vzduchu s otepľujúcou sa klímou (vz)rástli na väčšine sledovaných lokalít západného Slovenska výraznejšie v porovnaní s nočnými minimami. Lokálne sa však môžu objaviť miesta s obráteným charakterom otepľovania, ako sa ukázalo v prípade stanice Bratislava-letisko.

Vytvára otázka, či a do akej miery mohol k tomuto stavu prispieť proces bratislavskej suburbanizácie a s ňou spojené zmeny, súvisiace s fenoménom tamojšieho mestského ostrova tepla (Šveda a Šuška, 2019; Holec a kol., 2020), alebo ide o čistý dôsledok vplyvu prirodzených faktorov, akým je napr. vyššia veternosť lokality, či poloha v závetří Álp pri štandardne prevládajúcom prúdení zo západných smerov. V každom prípade však tento zistený detail núti poukázať na špecifický význam podmienok veľkých miest a aglomerácií v súčasnej dobe rýchleho otepľovania.

Z pohľadu praktických zistení pre budúce štandardné klimatologické spracovania sa preukázalo, že pri priemerovaných ročných hodnotách minimálna celodenná teplota vzduchu dosahuje veľmi podobné výsledky ako nočná minimálna teplota, a v dlhodobých hodnoteniach tohto druhu teda je možné používať ju ako zástupnú teplotnú charakteristiku v kontexte nocí.

V hodnotení nočných teplých vln v Hurbanove sa adekvátne potvrdili skoršie poznatky o osobitne výraznom pribúdaní dlhých období so silne nadnormálnymi hodnotami minim teploty vzduchu (Výberčí a kol., 2018b). Iné naše predošlé zistenie, o obzvlášť nápadne narastajúcom výskyte veľmi teplých nocí v sériách v letnom období (Babin a kol., 2021), sa pre zmenu ukazuje byť platným aj v celoročnom kontexte.

Na severnej pologuli bol na konci 90. rokov 20. storočia zistený prudký nárast vo výskyte nočných teplotných extrémov v období leta, majúci charakter režimového „skoku“ (Yeh a kol., 2021). Práve v letnej sezóne predstavujú veľmi teplé noci v exponovaných najteplejších oblastiach udalosti s najväčšími potenciálnymi zdravotnými rizikami pre zasiahnutú populáciu. Na túto časť roka sme preto pri hodnotení upriamili pozornosť osobitne a zistené výsledky preukazujú výnimočnosť pozorovaného stavu. Naše výsledky signalizujú, že od konca 2. svetovej vojny sa až zhruba 90 % celkového trvania a intenzity letných vln teplých nocí, čo možno v prenesenom zmysle interpretovať ako týmito periódami vyvolaný potenciálny nočný teplotný stres, naakumulovalo v období po roku 1990. Humánno-biometeorologické analýzy sa v problematike nočných teplôt ďalej ponúkajú ako celkom evidentný krok smerom do aplikovanej sféry a oblasti hodnotení a ich dôsledkov na spoločnosť. Pre prípadné budúce spracovania tohto druhu však znovu upozorňujeme na potrebu uvažovať v nich aj nad kratšie trvajúcimi periódami, keďže z nedávnej minulosti sú známe negatívne zdravotné dôsledky teplotného stresu na Slovensku už pri dvojdnovom trvaní letných periód horúceho počasia (Výberčí a kol., 2015 a 2018a).

Teplotné pomery nocí sú v určitých ohľadoch nepochybné zaujímavou problematikou a dostatočne dlhá tradícia klimatologickej evidencie nočnej minimálnej teploty vzduchu, hoci táto nepredstavuje štandardnú charakteristiku primárneho záujmu, nám na Slovensku umožňuje vhodne skúmať ich rôznorodé aspekty. V práci sme uviedli a vyhodnotili niektoré z perspektívy klimatológie najzákladnejšie možnosti využitia predmetnej teplotnej charakteristiky. Okrem toho môže byť nočná minimálna teplota zužitkovaná aj na ďalšie zaujímavé špecifické účely, napr. v kombinácii s celodennou minimálnou teplotou na analýzu ochladení v priebehu dennej doby. Zásadnú potenciálnu príležitosť

však predstavuje predovšetkým spomínané následné aplikovanie charakteristiky v oblasti humánnej biometeorológie (bioklimatológie), ktorému by sme sa radi venovali v rámci našich nasledujúcich aktivít.

Podakovanie

Za pomoc pri zhromažďovaní údajov pre analytickú časť práce ďakujeme zamestnancom meteorologického observatória SHMÚ v Hurbanove.

LITERATÚRA

- Altena, E.–Baglioni, C.–Sanz-Arigita, E.–Cajochen, C.–Riemann, D., 2023, *How to deal with sleep problems during heatwaves: practical recommendations from the European Insomnia Network. Journal of Sleep Research*, 32(2): e13704.
- Babin, L.–Pecho, J.–Onderka, M.–Faško, P.–Výberčí, D., 2021, *Tropické noci podľa nočnej minimálnej teploty vzduchu v Hurbanove (1945–2021). Meteorologický časopis* 24(2): 85–91.
- Davy, R.–Esau, I.–Chernokulsky, A.–Outten, S.–Zilitinkevich, S., 2017, *Diurnal asymmetry to the observed global warming. Bulletin of the American Meteorological Society* 37(1): 79–93.
- Faško, P.–Bochníček, O.–Markovič, L., 2022, *Evolution of the long-term average values of air temperature and atmospheric precipitation in Slovakia. Meteorologický časopis* 22(2): 79–88.
- Hass, A.L.–McCanless, K.–Cooper, W.–Ellis, K.–Fuhrmann, C.–Kintziger, K. W.–Sugg, M.–Runkle, J., 2022, *Heat exposure misclassification: Do current methods of classifying diurnal range in individually experienced temperatures and heat indices accurately reflect personal exposure? International Journal of Biometeorology* 66(7): 1339–1348.
- Holec, J.–Feranec, J.–Šťastný, P.–Szatmári, D.–Kopecká, M.–Garaj, M., 2020, *Evolution and assessment of urban heat island between the years 1998 and 2016: case study of the cities Bratislava and Trnava in western Slovakia. Theoretical and Applied Climatology* 141(3–4): 979–997.
- Krška, K.–Racko, S., 1993, *Horúce leto 1992 v Českej a v Slovenskej republike, jeho synoptický výklad a klimatologické zhodnotenie. Meteorologické zprávy* 46(2): 33–41.
- Labudová, L.–Faško, P.–Ivaňáková, G., 2015, *Changes in climate and changing climate regions in Slovakia. Moravian Geographical Reports* 23(3): 71–82.
- Lapin, M.–Šťastný, P.–Turňa, M.–Čepčėková, E., 2016, *High temperatures and heat waves in Slovakia. Meteorologický časopis* 19(1): 3–10.
- Minor, K.–Bjerre-Nielsen, A.–Jonasdottir, S.S.–Lehmann, S.–Obradovich, N., 2022, *Rising temperatures erode human sleep globally. One Earth* 5(5): 534–549.
- Obradovich, N.–Migliorini, R.–Mednick, S.C.–Fowler, J.H., 2017, *Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate. Science Advances* 3(5): e1601555.
- Rippstein, V.–de Schrijver, E.–Eckert, S.–Vicedo-Cabrera, A.M., 2023, *Trends in tropical nights and their effects on mortality in Switzerland across 50 years. PLOS Climate* 2(4): e0000162.
- Royé, D.–Sera, F.–Tobías, A.–Lowe, R.–Gasparrini, A.–Pascal, M.–de Donato, F.–Nunes, B.–Teixeira, J. P., 2021, *Effects of hot nights on mortality in Southern Europe. Epidemiology* 32(4): 487–498.

- Slabá, N., 1976, *Návod pre pozorovateľov meteorologických staníc ČSSR – Zborník predpisov III*. Bratislava: Hydro-meteorologický ústav, 273 pp.
- Sobišek, B. (ed.), 1993, *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, 594 pp.
- Šveda, M.–Šuška, P. (eds.), 2019, *Suburbanizácia – Ako sa mení zázemie Bratislavy?* Bratislava: Geografický ústav SAV, 300 pp.
- Vaghefi, S.A.–Muccione, V.–Neukom, R.–Huggel, C.–Salzmann, N., 2022, *Future trends in compound concurrent heat extremes in Swiss cities - An assessment considering deep uncertainty and climate adaptation options*. *Weather and Climate Extremes* 38: 100501.
- Výberčí, D.–Labudová, L.–Eštoková, M.–Faško, P.–Trizna, M., 2018a, *Human mortality impacts of the 2015 summer heat spells in Slovakia*. *Theoretical and Applied Climatology* 133(3-4): 925–936.
- Výberčí, D.–Pecho, J.–Faško, P.–Bochníček, O., 2018b, *Teplé a chladné obdobia na Slovensku (1951–2017) v kontexte klimateckej zmeny*. *Meteorologický časopis* 21(2): 101–108.
- Výberčí, D.–Švec, M.–Faško, P.–Savinová, H.–Trizna, M.–Mičietová, E., 2015, *The effects of the 1996–2012 summer heat events on human mortality in Slovakia*. *Moravian Geographical Reports* 23(3): 58–70.
- WMO, 2017, *WMO guidelines on the calculation of climate normals*. WMO-No. 1203, Ženeva: 18 pp.
- Wu, S.–Luo, M.–Zhao, R.–Li, J.–Sun, P.–Liu, Z.–Wang, X.–Wang, P.–Zhang, H., 2023, *Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves*. *Npj | Climate and Atmospheric Science* 6(1): 36.
- Yeh, S.-W.–Lee, E.-H.–Min, S.-K.–Lee, Y.-H.–Park, I.-H.–Hong, J.-S., 2021, *Contrasting factors on the trends in hot days and warm nights over Northern Hemisphere land during summer*. *Weather and Climate Extremes* 34: 100389.