

ČASOVÁ PROMĚNLIVOST HORKÝCH VLN V ČESKÉ REPUBLICĚ A EXTRÉMNÍ HORKÁ VLNA Z ROKU 1994

Temporal variability of heat waves in the Czech Republic and the severe 1994 heat wave. The analysis of heat waves at more than fifty stations in the Czech Republic shows the temperature exceptionality of the 1990s when the most severe summer seasons occurred. In 1992 and 1994, long periods with high air temperature and decreased interdiurnal temperature variability were related to persistent circulation patterns over Europe with high pressure systems influencing central Europe. The highest air temperatures ever recorded in the Czech Republic, reaching 40°C in south and central Bohemia, were observed in 1983 but they were confined to relatively short periods and heat waves did not reach a severity comparable with 1992 and 1994. The occurrence of long and severe heat waves in the 1990s may reflect an enhanced persistence of the atmospheric circulation over central Europe in summer season, because all groups of circulation types have considerably increased residence times in the 1990s compared to long-term means. The nature of the long-term temporal heat wave distribution is dominated by a small number of large peaks. The enhanced heat wave occurrence in the 1940s – early 1950s as well as their almost total absence in the first two decades of the 20th century and around 1980 seem to be common features for a larger area of at least central Europe. The July–August 1994 heat wave was the most severe heat wave from the beginning of uninterrupted temperature measurements at Prague–Klementinum (1775). Using an AR(1) model of maximum daily temperature, an upper limit of the return period of a heat wave lasting at least 34 days (as observed in 1994) was estimated to be 700 years at Strážnice, and the return period of the observed 18-day spell of tropical days is in the order of thousands of years. An increase in the mean summer temperature of 3°C would result in a 100-fold increase in this probability. The extreme 1994 heat wave as well as the preceding June 1994 heat wave were associated with a considerable increase in total mortality and mortality due to cardiovascular diseases in the Czech Republic.

KLÍČOVÁ SLOVA: vlna horká – proměnlivost časová – Česká republika – pravděpodobnost opakování – úmrtnost – rok 1994

1. ÚVOD, DATA A DEFINICE

Tento příspěvek shrnuje a rozšiřuje výsledky prací [17, 18, 19, 20], ve kterých byly analyzovány horké vlny v ČR zejména z hlediska jejich časové a prostorové proměnlivosti, vztahu k atmosférické cirkulaci a pravděpodobnosti opakování. Navazuje také na dřívější práce [12, 13, 14], v nichž byl podán rozbor horkých letních sezon 1983, 1992 a 1994.

První část analýzy (část 2) je založena na datech z více než 50 klimatických stanic v ČR za období 1961–1998, bližší popis je uveden v [17]. Stanice zhruba pokrývají území ČR, jejich nadmořská výška je v rozmezí 158 m n. m. (Doksany) až 1 324 m n. m. (Lysá hora). Horké vlny však nejvýše zasáhly stanici Milešovku (833 m n. m.), na Churáňově ani Lysé hoře se již nevyskytují. Kromě těchto dat byla použita teplotní řada z Prahy–Klementina, a to od počátku nepřetržitých záznamů v roce 1775 (část 3).

Horké vlny jsou definovány jako souvislá období splňující podmínky

- (i) alespoň ve 3 dnech maximální denní teplota vzduchu (T_{MAX}) ≥ 30.0 °C;
- (ii) průměrná T_{MAX} za celé období ≥ 30.0 °C;
- (iii) T_{MAX} ve všech dnech ≥ 25.0 °C.

Definice vychází z přístupu uvedeného v meteorologickém slovníku [24] a je stejná jako v dalších publikacích, např. [18, 19, 20], kde je také podrobněji diskutována.

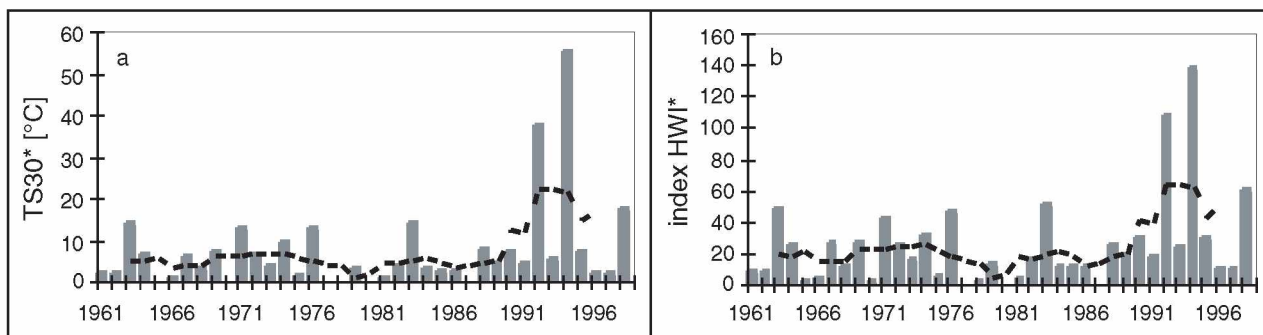
Z proměnných popisujících horké vlny zde budou uvažovány především jejich délka a teplotní suma TS30, definovaná jako součet $T_{MAX} - 30.0$ °C pro dny s $T_{MAX} > 30.0$ °C v horké vlně. V pracích [17, 18] byl dále zaveden index horké vlny HWI; jedná se o proměnnou, která zahrnuje charakteristiky horké vlny odvozené z maximální a minimální denní teploty vzduchu a srážkových úhrnů a popisuje její intenzitu. Pro popis intenzity je však vhodnou proměnnou i samotná suma

TS30. Průměrné nebo úhrnné roční charakteristiky horkých vln budou nadále označovány symbolem * tam, kde by mohly být zaměněny s průměrnými charakteristikami individuálních horkých vln.

2. ČASOVÁ PROMĚNLIVOST HORKÝCH VLN V ČR V LETECH 1961–1998

Časové rozdělení horkých vln v období 1961–1998 zachycuje obr. 1. Maximální intenzita připadá jednoznačně na 90. léta (především roky 1992 a 1994), minimální na přelom 70. a 80. let. Podobné rozdělení s výrazným maximum v 90. letech a minimum kolem roku 1980 by bylo patrné i pro hlazené křivky průměrné T_{MAX} měsíců květen–září (TX59) a červenec–srpen (TX78). Zajímavé přitom je, že horké léto 1983, v němž byly zaznamenány dosud nejvyšší teploty vzduchu v ČR, se vyskytlo v jinak chladném (pokud jde o letní teploty a četnost horkých vln) období 1977–1987. Výjimečnost 90. let se ještě výrazněji projevuje v počtu dlouhých horkých vln (o délce ≥ 12 dní). Jejich počet je za roky 1991–1998 větší nebo stejný ve srovnání s celým obdobím 1961–1990 (obr. 2); výjimku tvoří některé stanice v jižních a západních Čechách a v Polabí. Převaha dlouhých horkých vln v 90. letech je zřetelná především na Moravě, a to i na teplých stanicích (počty dlouhých horkých vln v období 1961–1990 a 1991–1998 jsou např. v Pohořelicích 4 a 8, Strážnici a Kuchařovicích 2 a 5, Starém Městě u Uherského Hradiště 3 a 5 atd.).

Pokud jde o jednotlivé roky, mezi všemi zřetelně vynikají 1992 a 1994 (obr. 1, tab. 1). Léto 1992 bylo charakteristické pozvolným velmi plynulým nárůstem teploty s pouze minimálním počtem větších ochlazení; odráží to situaci s méně častým přechodem atmosférických front zasahujících do počasí ve střední Evropě [13]. 9.–10. srpna a 29. srpna 1992



Obr. 1 Horké vlny v ČR v letech 1961–1998. Zobrazeny jsou charakteristiky a) teplotní suma TS30*, b) index HWI*. Křivka představuje klouzavé pěti-leté průměry. Hodnoty jsou zprůměrovány pro celou ČR.

Fig. 1. Heat waves in the Czech Republic in 1961–1998; a) cumulative T_{MAX} excess above 30°C, TS30*, b) heat wave index, HWI*. Smoothed curves show 5-year running means. Mean values for the Czech Republic are depicted.

byly zaznamenány mimořádně vysoké průměrné denní teploty, s maximem 31.2 °C v Ostravě-Mošnově, a 29.–30. srpna také rekordně vysoká minima, s nejvyšší hodnotou 26.9 °C v Bystřici pod Hostýnem (tab. 1, [16]). Z padesáti nejvyšších průměrných denních teplot v ČR v období 1961–2000 bylo 34 naměřeno v létě 1992 (tab. 2, [16]). Třebaže se v roce 1992 vyskytla také absolutně nejdelší horká vlna v ČR (Olomouc-Slavonín, 37 dnů), na většině stanic bylo horké období přerušeno poklesem T_{MAX} pod 25.0 °C, a počtem tropických dnů, teplotní sumou TS30 a na velké většině stanic i délkou její výrazně překonala horká vlna z roku 1994.

V létě 1994 se střední Evropa většinou rovněž nacházela pod vlivem oblastí vyššího tlaku vzduchu a studené fronty postupující na východ ztrácely nad kontinentem výraznost [14]. Horké období vrcholilo 30. července až 1. srpna, kdy byla v Poděbradech naměřena rekordně vysoká průměrná denní teplota 31.7 °C (tab. 1), ale výraznější změnu přinesla až fronta postupující přes střední Evropu kolem 10. srpna.

Horká vlna byla mimořádná zejména souvislým až 19denním (16denním) obdobím dnů s $T_{MAX} \geq 30.0$ °C (32.0 °C), blíže viz [14] a část 4 a 5.

Dalším rokem v pořadí podle intenzity horkých vln je 1998, ačkoli TX78 ani TX59 nebyly v tomto roce nadnormální. Na rozdíl od let 1992 a 1994 byla pro léto 1998 typická velká proměnlivost teploty a rychlé střídání teplých a chladných období. Při třech situacích vystoupily T_{MAX} v níže položených oblastech ČR zhruba na 35 °C (kolem 6. června, 21. července a 11. srpna), období s vysokými teplotami však byla relativně krátká. Během horké vlny, která na níže položených stanicích v Čechách trvala zhruba od 19. do 25. července a vrcholila 21. července (např. Louny 39.0 °C, Žatec 38.0 °C), se vyskytly v noci z 22. na 23. července přívalové srážky spojené s přechodem zvlněné studené fronty, které vyvolaly záplavy v podhůří Orlických hor. Velmi teplý tropický vzduch, který fronta oddělovala od chladnějšího oceánského, přispěl v oblasti vrcholu frontální vlny k rozvoji mohutné bouřkové oblačnosti [5].

Tab. 1 Některé letní teplotní rekordy období 1961–1998 v ČR.

Table 1. Record-breaking summer temperature- and heat wave characteristics in the Czech Republic in 1961–1998.

Charakteristika	Hodnota	Datum	Zdroj	Stanice
nejvyšší maximální denní teplota	40.2 °C	27.7. 1983	[16]	Praha-Uhřetěves
nejvyšší minimální denní teplota	26.9 °C	29.8. 1992	[16]	Bystřice pod Hostýnem
nejvyšší průměrná denní teplota	31.7 °C	1.8. 1994	[16]	Poděbrady
nejvyšší suma TS30 v individuální horké vlně	79.7 °C	1994	–	Pohořelice nad Jihlavou
nejdelší horká vlna	37 dní	1992	[17]	Olomouc-Slavonín
nejdelší souvislé období tropických dnů	19 dní	1994	[14]	Brno-Žabovřesky, Šumperk
nejdelší souvislé období dnů s $T_{MAX} \geq 32.0$ °C	16 dní	1994	[17]	Hradec Králové
nejvyšší roční suma TS30* v horkých vlnách	114.4 °C	1994	–	Hradec Králové
nejdelší roční trvání horkých vln	52 dnů	1994	–	Pohořelice nad Jihlavou
nejvyšší roční počet tropických dnů	34 dnů	1994	–	Pohořelice nad Jihlavou

Tab. 2 Rozdělení výskytu 50 nejvyšších teplot vzduchu naměřených v období 1961–2000 v ČR. Zpracováno podle [16]. Jsou zahrnuty všechny výskyty teploty stejné jako na 50. místě, proto je počet případů vyšší než 50.

Table 2. Occurrence of 50 highest air temperatures measured in the Czech Republic in 1961–2000 (according to [16]).

Charakteristika	rok	1983	1984	1988	1992	1994	1997	1998	ostatní (<2)	součet
průměrná denní teplota		3	1	3	34	9			1	51
maximální denní teplota		32	5		1	12		5	2	57
minimální denní teplota				6	16	16	2	6	5	51

Rokem s výrazně nadnormální průměrnou letní T_{MAX} je vedle let 1992 a 1994 především 1983, kdy byla na stanicích v Čechách zaznamenána absolutní teplotní maxima [12, 16]. Horké vlny výrazněji zasáhly především jižní Čechy, zatímco na severní Moravě se neprojeví téměř vůbec. Teplota 40.2 °C na stanici Praha-Uhřetěves je dosud nejvyšší naměřenou maximální denní teplotou vzduchu v ČR (tab. 1, [16]); $T_{MAX} \geq 39.0$ °C byla v období 1961–2000 naměřena na 17 stanicích, z toho na patnácti 27. července 1983 (viz také tab. 2). Trvání horkých vln, jejich intenzita i samotný počet tropických dnů však byly výrazně nižší než v letech 1992 a 1994. Absolutně nejvyšší teploty v ČR tedy nebyly spojeny s dlouhotrvajícím horkým obdobím, ale s krátkodobou situací výrazně teplé advekce na přední straně brázd nízkého tlaku vzduchu před zvlněnou studenou frontou, podle [12] pravdě-

podobně podpořené fénovým efektem v závětrí Alp. Zajímavé přitom je, že ačkoli byla v roce 1983 TX78 (TX59) o 2.3 (1.0) °C vyšší než roku 1998 (průměr pro ČR), horké vlny byly v létě 1998 intenzivnější. Intrasezonní proměnlivost teploty tedy významně ovlivňuje možnost rozvoje horkých období.

Zvýšený výskyt dlouhých a intenzivních horkých vln v 90. letech může odrážet mj. zvýšenou perzistenci atmosférické cirkulace (dobu života cirkulačních typů) nad Evropou v létě. Tato vyšší perzistence cirkulace byla zjištěna v letním [19] i zimním období roku [27] a může souviset rovněž s dalšími teplotními i jinými anomáliemi, pozorovanými v nedávné době.

3. DLOUHODOBÉ ZMĚNY VÝSKYTU HORKÝCH VLN V PRAZE-KLEMENTINU

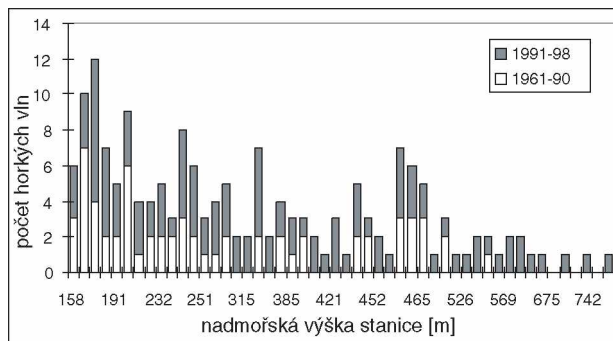
Vzhledem k možným nehomogenitám v klementinské teplotní řadě v 18. a 19. století (viz [1, 6]) jsem se soustředil na proměnlivost horkých vln ve 20. století; změny od roku 1775 jsou orientačně znázorněny na obr. 3, z něhož je patrné, že charakteristiky horkých vln jsou ve 20. století vyšší než po většinu předchozího období.

Časové rozdělení horkých vln ve 20. století zachycuje obr. 4, kde jsou roční sumy TS30* porovnány s průběhem průměrné T_{MAX} období červenec-srpen (TX78), vyjádřené jako odchylka od dlouhodobého normálu. Extrémními roky, pokud jde o teplotní sumy a celková trvání horkých vln, byly především 1994, 1947, 1992 a 1952; všechny náleží také mezi roky s nejteplejšími letními sezonami. Léto 1994 je mimořádné především výrazně vyšší sumou TS30*, zatímco ostatní charakteristiky horkých vln (např. trvání, počet tropických dnů, nejvyšší T_{MAX}) jsou v uvedených čtyřech letech podobné. Za zmínku stojí skutečnost, že některé výrazně teplotně nadnormální letní sezony nejsou charakteristické zvýšeným výskytem horkých vln; zejména se jedná o roky 1995, 1944, 1950 a 1951.

Většina nejteplejších letních sezon 20. století podle průměrné teploty i charakteristik horkých vln spadá do období kolem poloviny století a na počátek 90. let (obr. 4); v 90. letech byly přitom individuální horké vlny intenzivnější než v období kolem poloviny 20. století. Horké vlny se naproti tomu jen sporadicky objevují v pozorováních z počátku 20. století a (v menší míře) kolem roku 1980. Dvacetiletí 1901–1920, kdy se vyskytly pouze ve čtyřech letech, také pokrývá všechny roky 20. století, v nichž se v Praze vůbec neobjevily tropické dny (1902, 1903, 1909, 1910, 1912, 1914 a 1916). Zatímco první dvě desetiletí 20. století byla obdobím snížené kontinentality evropského klimatu (např. [11, 26]), s teplými zimami a chladnými léty, ve 40. letech nastalo v rozsáhlých částech Evropy výrazné maximum kontinentality. Podobně nápadné výkyvy od maritimního ke kontinentálnímu klimatu

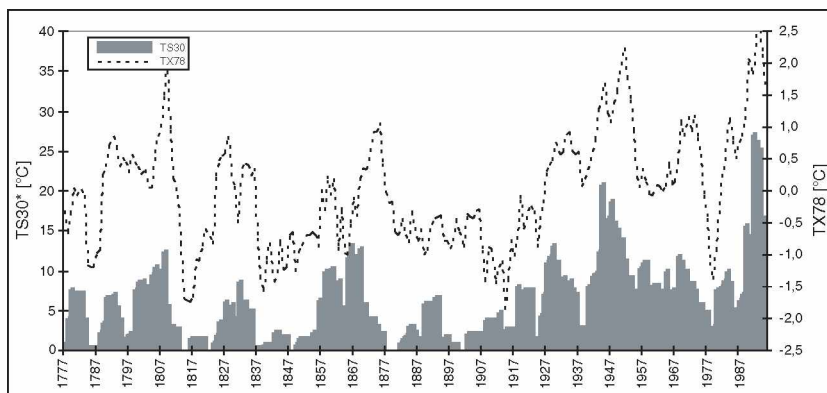
a opačně se ve střední Evropě již později nevyskytly a v období horkých letních sezon v 90. letech převládaly zimy mírné. Téměř naprostá absence horkých vln v prvních dvou desetiletích 20. století i vrchol v polovině 20. století jsou společnými rysy časového rozdělení ve středoevropském měřítku, blíže viz [19].

Za zmínku stojí skutečnost, že dvě ze čtyř nejintenzivnějších horkých vln (tab. 3) se v Praze vyskytly mimo teplá obdo-



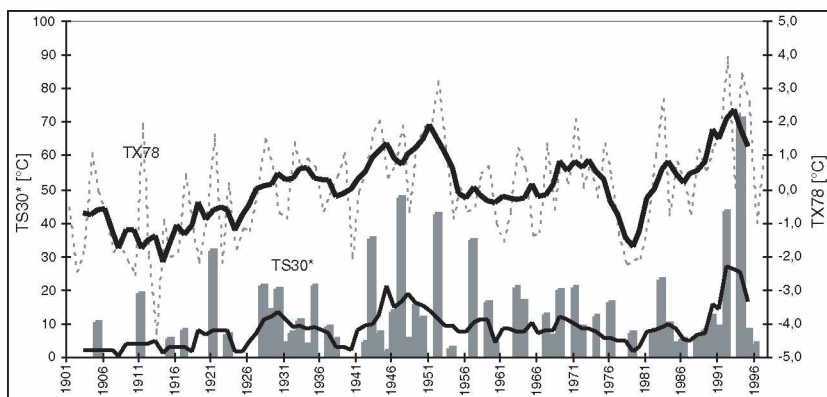
Obr. 2 Horké vlny o délce ≥ 12 dní na stanicích v ČR.

Fig. 2. Heat waves lasting ≥ 12 days at stations in the Czech Republic.



Obr. 3 Pětileté klouzavé průměry roční sumy T_{MAX} nad 30.0 °C v horkých vlnách (TS30*, sloupce) a průměrné T_{MAX} července-srpna (TX78, čárkovaná křivka, odchylka od dlouhodobého normálu) v Praze-Klementinu v období 1775–1997.

Fig. 3. 5-year running means of cumulative T_{MAX} excess above 30 °C in heat waves (TS30*, columns) and mean July-August T_{MAX} anomaly (TX78, dashed curve) at Prague-Klementinum in 1775–1997.



Obr. 4 Roční suma T_{MAX} nad 30.0 °C v horkých vlnách (TS30*, spodní část grafu) a průměrná T_{MAX} července-srpna (TX78, horní část grafu, odchylka od dlouhodobého normálu) v Praze-Klementinu v období 1901–1997. Hlazené křivky znázorňují pětileté klouzavé průměry. Upraveno podle [19].

Fig. 4. Heat waves at Prague-Klementinum in 1901–1997 as measured by cumulative T_{MAX} excess above 30 °C (TS30*) and mean July-August T_{MAX} anomaly (TX78). Smoothed curves show 5-year running means. From [19].

bí v polovině 20. století a v 90. letech, a to v roce 1957 ($TS30 = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$) a 1921 ($TS30 = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$). Téměř paradoxní pak je, že druhá nejvýraznější horká vlna v historii klementinských měření se objevila na přelomu června a července 1957, tedy v roce se zápornou odchylkou průměrné letní teploty (za květen–září i červenec–srpen) od dlouhodobého normálu. Sporadické horké vlny v chladnějším období přitom mohou být kvůli omezené možnosti adaptability nebezpečnější než pravidelně se vyskytující horká období v teplejším klimatu, a z podobných důvodů se zdravotní komplikace objevují častěji na počátku léta; tato horká vlna tedy kombinovala oba tyto nepříznivé faktory. O její mimořádnosti svědčí také fakt, že tři z pěti nejteplejších dní ve 20. století podle T_{MAX} byly v Klementinu zaznamenány mezi 4. a 7. červencem 1957, a absolutně nejvyšší minimální denní teplota 8. července 1957. Vysokých teplot bylo dosaženo díky dlouhodobému vlivu tlakové výše, podpořenému především v závěru období výraznou teplou advekci před pomalu postupující studenou frontou. Na Milešovce byl během této horké vlny zaznamenán dosud platný absolutní teplotní rekord $34.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a na Slovensku s ní byly spojeny rekordně vysoké noční teploty a nejdelší souvislé období tropických nocí v letech 1951–1975 [22].

Dlouhodobou proměnlivost výskytu horkých vln lze do značné míry vysvětlit změnami atmosférické cirkulace [19]. Např. situace s tlakovou výší nebo hřebenem vyššího tlaku nad střední Evropou byly častější (méně časté) ve všech teplých (chladných) obdobích podle charakteristik horkých vln ve srovnání s jejich dlouhodobým průměrem; pro první dvě desetiletí 20. století je charakteristické výrazné zvýšení četnosti severních typů a pokles četností jižních typů a situací s anticyklónou nad Fenoskandií, apod. Souvislost s atmosférickou cirkulací je pak zvláště průkazná v 90. letech 20. století, kdy je v létě pozorován mj. výrazný nárůst četnosti anticyklonálních situací na úkor cyklonálních, a zvýšení průměrné doby života všech cirkulačních typů. Spíše než s globálními změnami teploty je tedy třeba hledat spojitost s proměnlivostí atmosférické cirkulace nad Evropou. Ta může být projevem přirozeného kolísání klimatu i změn vyvolaných zásahy člověka do radiční bilance soustavy Země – atmosféra.

4. MIMOŘÁDNÁ HORKÁ VLNA A SOUVISLÉ TROPICKÉ OBDOBÍ Z ROKU 1994 A PRAVDĚPODOBNOTI JEJICH OPAKOVÁNÍ

Na 86 % sledovaných stanic v ČR byla v létě 1994 zaznamenána nejdelší horká vlna za posledních 40 let, vrcholící kolem 31. července. Její délka přesáhla 30 dní na jižní Moravě, na všech stanicích do nadmořské výšky 670 m trvala alespoň 18 dnů a 18denní horkou vlnu zaznamenala dokonce i stanice Svratouch (737 m n. m.), která má v průměru méně než 1 tropický den ročně. Z hlediska teplotní sumy $TS30$ převýšila na většině stanic 1.5 až 3násobně druhou nejvýraznější horkou vlnu od roku 1961. Její mimořádnost je však zřejmá i v kontextu celé klementinské řady; analýza sahající k roku 1775 naznačuje, že v žádné epizodě letních veder se teplotní suma $TS30$ nepřiblížila hodnotě pro horkou vlnu z roku 1994 (ani horkým vlnám z let 1957 a 1992).

Její největší zvláštností bylo výjimečně dlouhé nepřerušované období po sobě jdoucích tropických dnů [14] a dnů s $T_{MAX} \geq 32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na většině stanic na Moravě do nadmořské výšky 500 m trvalo tropické období na přelomu července a srpna 17–19 dní; v Čechách se výrazněji projevilo ochlazení související s přechodem fronty 2. srpna a celé období trvalo nejvýše 16 dní, většinou však do nadmořské výšky 500 metrů 9–11

a. Extrémní horké vlny						b. Nejdelší nepřerušovaná období tropických dnů		
Rok	Od	Do	Délka [dny]	Nejvyšší T_{MAX} [$^{\circ}\text{C}$]	$TS30$ [$^{\circ}\text{C}$]	Rok	Délka [dny]	Nejvyšší T_{MAX} [$^{\circ}\text{C}$]
1994	21/7	11/8	22	36.0	47.6	1994	16	36.0
1957	28/6	10/7	13	37.6	34.2	1911	9	33.5
1992	16/7	10/8	26	35.8	33.3	1921	7	34.7
1921	23/7	12/8	21	34.7	31.4	1929	7	34.0
1952	31/7	16/8	17	35.5	21.9	1942	7	31.5

Tab. 3 Nejintenzivnější horké vlny (podle $TS30$) a nejdelší souvislá období tropických dnů v Praze-Klementinu (1901–1997). Převzato z [19].

Table 3. The most severe heat waves (as measured by cumulative T_{MAX} excess above $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $TS30$) and the longest continuous periods of days with $T_{MAX} \geq 30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ at Prague-Klementinum, 1901–1997. From [19].

dní. V Praze-Klementinu bylo zaznamenáno 16 po sobě jdoucích tropických dnů; druhé nejdelší takové období ve 20. století trvalo pouze 9 dnů (r. 1911) a více než 6 souvislých tropických dnů se vyskytlo naposledy roku 1942. Za zcela mimořádné pak lze pokládat nepřerušované období, během něhož nepoklesla T_{MAX} pod $32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; trvalo na řadě míst 10 dní a více. Jedná se prakticky o všechny stanice jižní Moravy (např. Staré Město 15 dní, Moravské Budějovice 14, Kuchařovice a Pohorelice 13), některé stanice střední a severní Moravy (Olomouc-Slavonín, Holešov, Opava a Ostrava-Mošnov 10 dní) a některé stanice v Čechách, především Hradec Králové s rekordní délkou 16 souvislých dnů s $T_{MAX} \geq 32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dále Žatec, Doksany (11 dní) a Jablonné (10 dní). Maximální trvání dalšího nepřerušovaného období s $T_{MAX} \geq 32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je přitom na všech stanicích pouze 3–6 dnů.

Možnost odhadu pravděpodobnosti opakování této horké vlny a souvislého tropického období byla diskutována v [20]. Časové řady T_{MAX} v létě lze v dobrém přiblížení modelovat autoregresním modelem prvního řádu [AR(1)], využívajícím tři parametry – průměr, rozptyl a autokorelační koeficient s krokem 1 den; diskuse ohledně volby modelu je např. v [2], aplikace modelu pro odhad pravděpodobnosti horkých vln v [20] a odhad řádu modelu pro teplotní řady v ČR v [10]. Pomocí tohoto modelu byly simulovány řady T_{MAX} o délce 100 000 let; vlastnosti těchto řad jsou v dobré shodě s pozorováním i pokud jde o charakteristiky extrémních jevů (četnosti překročení prahových hodnot v jednotlivých dnech a v souvislých obdobích) včetně rozdělení délek horkých vln [20].

Dlouhé horké vlny pozorované v roce 1994 lze pokládat za mimořádné a pravděpodobnost jejich opakování při nezměněných teplotních podmínkách je malá. Pro Prahu-Ruzyni je např. perioda opakování horké vlny o délce 17 dní (21. 7.–6. 8. 1994) zhruba 100 let, zatímco pro Strážnici perioda opakování horké vlny o délce 34 dní (11. 7.–13. 8. 1994) kolem 700 let. Hodnoty je třeba brát jako orientační. Představují pravděpodobně horní hranici odhadu, neboť pozorované teplotní řady nejsou pouhou realizací AR(1) modelu, ale projevují se v nich mj. perzistence s delšími časovými kroky, kterou nelze AR(1) modelem vysvětlit, poněkud odlišné rozdělení proměnlivosti na složku meziroční (kterou AR(1) model mírně podhodnocuje) a intrasezonní (kterou nadhodnocuje), nebo dlouhodobé kolísání klimatu.

Model je do určité míry schopen zachytit i souvislá období tropických dnů; např. pro stanici Strážnice je perioda opakování 12denního tropického období 200 let. Situace obdobné roku 1994 se však v simulacích vyskytují jen ojediněle,

např. ve Strážnici (Klatovech) je perioda opakování 18denního (16denního) nepřerušeno období tropických dnů 7 000 (6 000) let. Pro realističtější odhad pravděpodobnosti situace obdobné roku 1994 by zřejmě bylo nutné použít AR model vyššího řádu. K zajímavým výsledkům však lze dospět tehdy, pokud uvažujeme periody opakování souvislých období tropických dnů při změněné průměrné teplotě. Nárůstu průměrné T_{MAX} v letním období roku o 1–3 °C totiž podle AR(1) modelu odpovídá pokles period opakování např. 18denního tropického období ve Strážnici ze 7 000 let na 1 100 let (zvýšení průměrné T_{MAX} o 1.0 °C) až 65 let (zvýšení průměrné T_{MAX} o 3.0 °C). Se stejnou četností jako alespoň 18denní období při současných podmínkách by se podle tohoto modelu v klimatu teplejším o 3 °C vyskytovala tropická období o délce přesahující 30 dnů. I relativně malé změny průměrné teploty by tedy vedly ke značnému prohloubení těchto extrémů [20].

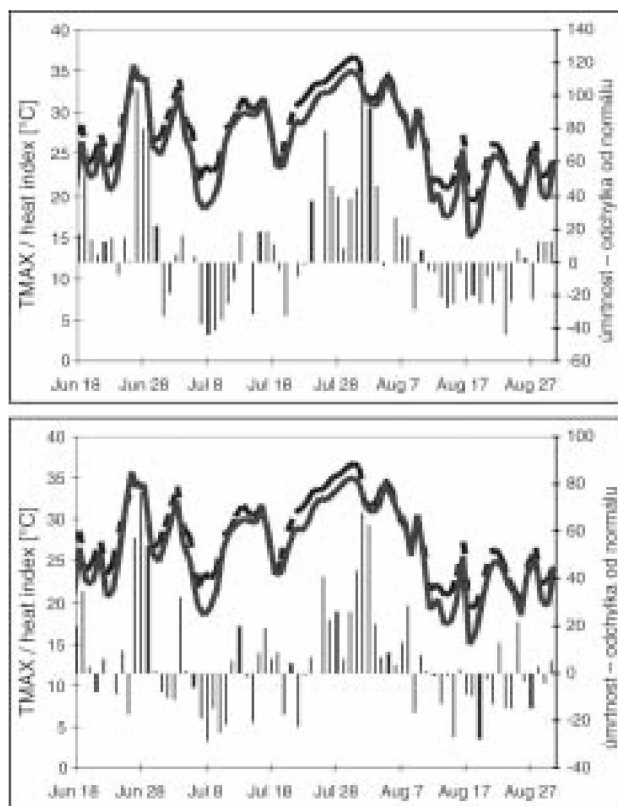
5. ÚMRTNOST V HORKÝCH VLNÁCH V ROCE 1994

Zvýšená úmrtnost představuje jeden z hlavních dopadů extrémních teplotních jevů na společnost. Její nárůst během horkých vln byl v evropských podmínkách popsán mj. ve Velké Británii, Nizozemsku, Belgii, Španělsku, Portugalsku, Itálii a Řecku. Meteorologickou proměnnou, která nejlépe vystihuje dopady na lidské zdraví, je tzv. heat index, vycházející z teploty vzduchu a jeho vlhkosti a odrážející schopnost lidského těla disipovat teplo [25]. Na grafu průběhu T_{MAX} , heat indexu¹ a odchylky celkové úmrtnosti, resp. úmrtnosti na kardiovaskulární nemoci od normálu (určenému za období 1982–2000, s odstraněním dlouhodobého poklesu úmrtnosti) v létě 1994 (obr. 5) lze demonstrovat několik efektů, které se v řadách úmrtnosti projevují:

(i) *Zvýšení úmrtnosti související s horkem.* V obou hlavních teplotních vrcholech (ca 28. 6. a 31. 7.) i ve většině dílčích vrcholů je patrné výrazné zvýšení úmrtnosti. Např. ve všech dnech období 24. 7. až 3. 8. byla úmrtnost v ČR nadnormální; rozdíl oproti normálu přesahuje 100 úmrtí za den v obou hlavních vrcholech. Odchylka celkové úmrtnosti od normálu pro období 17.–30. 6. činila +456 úmrtí (+10.3 %), pro období 24. 7.–3. 8. +543 úmrtí (+16.2 %). Nejvyšší denní odchylky od normálu pak byly +114 úmrtí (+37%) 1. 8. a +104 úmrtí (+33%) 27. 6.; odchylka od normálu byla kladná i pro celé léto (+371 úmrtí, tj. +1.3 %). Obdobně výrazný byl nárůst úmrtnosti na kardiovaskulární nemoci; v období 17.–30. 6. činil +248 úmrtí (+10.2 %), v období 24. 7.–3. 8. +324 úmrtí (+17.7 %), a v celém období červen-srpen +319 úmrtí (+2.1 %).

(ii) *Posun úmrtnosti.* Výrazný pokles úmrtnosti nastal po obou horkých vlnách; úmrtnost byla podnormální např. v celém období 7.–12. 7. (rozdíl celkové úmrtnosti proti normálu -196 úmrtí) i 11.–24. 8. (-270 úmrtí). Efekt je způsoben skutečností, že oběti tvoří zčásti lidé, kteří by zemřeli brzy bez ohledu na počasové podmínky; bývá označován jako posun úmrtnosti (*mortality displacement*) nebo tzv. *harvesting* efekt [8, 23]. Pro červnovou horkou vlnu v roce 1994 činila tato posunutá úmrtnost asi 52 %, pro horkou vlnu na přelomu července a srpna 48 %, což jsou hodnoty vyšší, než k jakým dospěli autoři jiných prací (20–40 % [8]; kolem 10 % [23, 28]).

¹ Maximální denní teplota a heat index pro ČR byly vypočteny jako průměr těchto prvků ze stanic Klatovy, Praha-Ruzyně, Hradec Králové, Brno-Tuřany a Ostrava-Mošnov



Obr. 5. Průběh odchylky úmrtnosti od normálu (sloupce), T_{MAX} (čárkovaná křivka) a heat indexu (plná křivka) v létě 1994 v ČR. Nahore pro celkovou úmrtnost, dole pro úmrtnost na kardiovaskulární nemoci.

Fig. 5. Excess mortality (columns; right y-axis), T_{MAX} (dashed curve; left y-axis) and heat index (solid curve; left y-axis) in summer 1994 in the Czech Republic. Tops (bottom) figure is for total mortality (mortality due to cardiovascular diseases).

(iii) *Efekt adaptace.* Dva krátce po sobě jdoucí teplotní vrcholy 28. 6. a 4. 7. byly provázeny výrazně odlišnou úmrtností. Třebaže se tu projevuje také kratší trvání druhé epizody veder a posun úmrtnosti, je pravděpodobné, že svou roli hraje také společenská i fyziologická adaptabilita na meteorologické podmínky. Podobně se efekt adaptace (společně s posunem úmrtnosti) projevuje v průběhu dlouhé horké vlny v červenci a srpnu, kdy úmrtnost po 26. 7. dočasně poklesla přes postupný nárůst teploty.

(iv) *Efekt vlhkosti vzduchu.* Zatímco teplota vzduchu byla vyšší na přelomu července a srpna než na konci června, heat index dosáhl vyšších hodnot na konci června, kdy byl vzduch výrazně vlhčí (průměrná denní teplota rosného bodu byla ve vrcholu první horké vlny 28. 6. 18.0 °C, zatímco ve vrcholu druhé horké vlny 31. 7. jen 12.5 °C). To může vysvětlovat (společně s adaptabilitou lidského organismu na dlouhodobě přetrvávající vysoké teploty a efektem posunu úmrtnosti), proč první horkou vlnu na konci června provázelo zvýšení úmrtnosti srovnatelné se situací na přelomu července a srpna.

Zároveň je zřejmé, že většina těchto efektů působí společně a nelze je jednoznačně odlišit. Pro srovnání lze uvést, že Sartor a kol. [23] zjistili během 42denního horkého období v létě 1994 na území Belgie nárůst úmrtnosti o 9.4 % ve věkové skupině do 64 let a o 13.2 % u starších osob, Huynen a kol. [7] pro 13denní období na území Nizozemska zvýšení o 1.6 % ve skupině do 64 let a o 30.7 % u starších osob. S ohledem na to, že všechny tři analýzy se vztahují k odlišnému časovému období především pokud jde o jeho délku, není přímé srovnání

možné. Zvláště údaje pro nizozemskou populaci však naznačují nižší nárůst úmrtnosti v ČR, což může být dáno tím, že tato horká vlna byla v západní Evropě intenzivnější, zejména vůči průměrným teplotním poměrům, než ve střední Evropě.

6. ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá časovou proměnlivostí horkých vln v ČR; pod horkými vlnami se rozumí různě dlouhá období mimořádně teplého letního počasí. Analýza horkých vln od roku 1961 v datech z více než 50 stanic pokrývajících ČR ukazuje na teplotní výjimečnost 90. let, kdy se vyskytly letní sezony s nejvyšší intenzitou horkých vln (1992, 1994 a 1998). Pro roky 1992 a 1994 byl charakteristický výskyt dlouhých úseků s vysokými teplotami a sníženou mezidenní teplotní proměnlivostí; rok 1983, kdy byla v jižních a středních Čechách zaznamenána absolutní teplotní maxima, se z hlediska horkých vln projevil slaběji. Ještě výrazněji dominují 90. léta rozdělení četností dlouhých horkých vln (alespoň 12denních), jejichž počty jsou za roky 1991–1998 větší nebo stejné ve srovnání s obdobím 1961–1990 na většině území ČR. Výskyt dlouhých a intenzivních horkých vln může odrážet zvýšenou perzistenci atmosférické cirkulace v letním období roku, neboť v 90. letech měly všechny skupiny povětrnostních situací, bez ohledu na to, zda se jedná o situace příznivé nebo nepříznivé pro rozvoj horkých vln, delší průměrnou dobu trvání oproti normálu. Vzhledem k navýšení četností anticyklonálních situací na úkor cyklonálních a situací příznivých pro horké vlny na úkor nepříznivých [17, 19] je zřejmé, že tato vyšší perzistence se promítla především do výskytu kladných teplotních extrémů.

Výrazné maximum horkých vln ve 40. letech a na počátku 50. let, stejně jako jejich téměř naprostá absence v prvních dvou desetiletích 20. století a kolem roku 1980, mohou být společné pro území zahrnující velkou část střední Evropy, jak naznačují i některé další studie zabývající se extrémními teplotními jevy. Naproti tomu vrchol intenzity horkých vln pozorovaný v Klementinu v 90. letech se např. na švýcarských stanicích neprojevuje [19]. Naznačený charakter rozdělení horkých vln je pravděpodobně ve střední Evropě podobný jako v USA, kde časovému rozdělení rovněž dominuje výrazný vrchol, v tomto případě ve 30. letech 20. století. Určené trendy výskytu horkých vln nebo extrémně vysokých teplot (včetně znamének) pak ovlivňuje skutečnost, zda je období se zvýšenou intenzitou horkých vln do analýzy zahrnuto [15] nebo nikoli [3, 4].

Horká vlna z přelomu července a srpna 1994 se jeví jako mimořádná v celé nepřerušené klementinské teplotní řadě od roku 1775. Výjimečná je především dlouhým obdobím po sobě jdoucích tropických dnů i dnů s $T_{MAX} \geq 32.0$ °C. Např. pro stanici Strážnice, kde trvala 34 dnů, byla ze simulací provedených s autoregresním modelem T_{MAX} prvního řádu odhadnuta pravděpodobnost výskytu takto dlouhé horké vlny na jednu za 700 let, zatímco perioda opakování pozorovaného 18denního nepřerušovaného období tropických dnů je řádu tisíců let. Pravděpodobnost opakování takto dlouhého nepřerušovaného období tropických dnů je v současných teplotních podmínkách malá, při zvýšení průměrné T_{MAX} v letním období o 3 °C, které je v rozmezí hodnot předpovídaných (ve smyslu předpovědi druhého druhu) pro $2 \times CO_2$ klima v ČR současnými klimatickými modely, by však vzrostla o dva řády.

V ČR byla tato horká vlna provázána nárůstem celkové úmrtnosti o 16 % a úmrtnosti na kardiovaskulární nemoci o 18 %, což jsou hodnoty srovnatelné s většinou obdobných evropských studií. Přestože zhruba polovinu obětí tvoří lidé,

kteří by zemřeli brzy bez ohledu na počasí podmínky, zůstává podíl úmrtí, jimž by bylo možné zabránit vhodnými preventivními opatřeními, vysoký. Tyto preventivní prostředky zahrnují tzv. „watch warning“ systémy, které např. v USA výrazně přispěly ke snížení úmrtnosti v některých nedávných epizodách letních veder [9, 21].

Poděkování. Za poskytnutí dat patří dík pracovníkům ČHMÚ a Státního zdravotního ústavu v Praze. Za cenné připomínky, které přispěly ke zlepšení textu, děkuji R. Huthovi (ÚFA AV ČR), J. Kalvové (MFF UK, Praha) a K. Krškovi (ČHMÚ, Brno). Část práce byla podpořena Grantovou agenturou ČR v rámci projektu 205/01/D040.

Literatura

- [1] BRÁZDIL, R. – BUDÍKOVÁ, M., 1999. An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, the Czech Republic. *Atmospheric Environment*, roč. **33**, s. 4211–4217.
- [2] COLOMBO, A.F. – ETKIN, D. – KARNEY, B.W., 1999. Climate variability and the frequency of extreme temperature events for nine sites across Canada: Implications for power usage. *Journal of Climate*, roč. **12**, s. 2490–2502.
- [3] DEGAETANO, A.T., 1996. Recent trends in maximum and minimum temperature threshold exceedences in the northeastern United States. *Journal of Climate*, roč. **9**, s. 1646–1660.
- [4] GAFFEN, D. – ROSS, R., 1998. Increased summertime heat stress in the U.S. *Nature*, roč. **396**, s. 529–530.
- [5] HANČÁROVÁ, E. et al., 1999. Katastrofální povodeň v podhůří Orlických hor ve dnech 22.–25. 7. 1998. *Meteorologické Zprávy*, roč. **52**, s. 1–12.
- [6] HLAVÁČ, V., 1937. Die Temperaturverhältnisse der Hauptstadt Prag. Teil I. Prager Geophysikalische studien VIII. Prague. 111 s.
- [7] HUYNEN, M.M.T.E. – MARTENS, P. – SCHRAM, D. – WEIJENBERG, M.P. – KUNST, A.E., 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environmental Health Perspectives*, roč. **109**, s. 463–470.
- [8] KALKSTEIN, L.S., 1993. Health and climate change: direct impacts in cities. *Lancet*, roč. **342**, s. 1397–1399.
- [9] KALKSTEIN, L.S. – JAMASON, P.F. – GREENE, J.S. – LIBBY, J. – ROBINSON, L., 1996. The Philadelphia hot weather-health watch/warning system: development and application, summer 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, roč. **77**, s. 1519–1528.
- [10] KALVOVÁ, J. – JUREČKOVÁ, J. – PICEK, J. – NEMEŠOVÁ, I., 2000. On the order of autoregressive (AR) model in temperature series. *Meteorologický Časopis*, roč. **3**, s. 19–23.
- [11] KONČEK, M., 1965. Kolísanie klímy od polovice minulého storočia. *Meteorologické Zprávy*, roč. **18**, s. 162–164.
- [12] KRŠKA, K. – MUNZAR, J., 1984. Teplotní zvláštnosti tropického léta 1983 v ČSSR a v Evropě. *Meteorologické Zprávy*, roč. **37**, s. 33–40.
- [13] KRŠKA, K. – RACKO, S., 1993. Horúce leto 1992 v Českej a Slovenskej republike, jeho synoptický výklad a klimatologické zhodnotenie. *Meteorologické Zprávy*, **46**, s. 33–41.
- [14] KRŠKA, K. – RACKO, S., 1996. Mimoriadne teplé leto 1994 v Českej a v Slovenskej republike. *Meteorologické Zprávy*, roč. **49**, s.12–21.
- [15] KUNKEL, K.E. – PIELKE, R.A. – CHANGNON, S.A., 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts:

- A review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, roč. **80**, s. 1077–1098.
- [16] KVĚTOŇ, V., 2001. Normály teploty vzduchu na území České republiky v období 1961–1990 a vybrané teplotní charakteristiky období 1961–2000. Praha, ČHMÚ. 217 s. Národní klimatický program ČR, sv. 30.
- [17] KYSELÝ, J., 2000. Změny ve výskytu extrémních teplotních jevů. [Doktorská disertační práce PGDS.] Praha, Univerzita Karlova, Fakulta matematicko-fyzikální. 97 s.
- [18] KYSELÝ, J. – KALVOVÁ, J. – KVĚTOŇ, V., 2000. Heat waves in the south Moravian region during the period 1961–1995. *Studia geophysica et geodaetica*, roč. **44**, 57–72.
- [19] KYSELÝ, J., 2002. Temporal fluctuations in heat waves at Prague-Klementinum, the Czech Republic, from 1901–1997, and their relationships to atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, roč. **22**, s. 33–50.
- [20] KYSELÝ, J., 2002. Probability estimates of extreme temperature events: stochastic modelling approach vs. extreme value distributions. *Studia geophysica et geodaetica*, roč. **46**, s. 93–112.
- [21] PALECKI, M.A. – CHANGNON, S.A. – KUNKEL, K.E., 2001. The nature and impacts of the July 1999 heat wave in the Midwestern United States: Learning from the lessons of 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, roč. **82**, s. 1353–1367.
- [22] RACKO, S., 1987. Obdobia letných a tropických dní a tropické noci na Slovensku v rokoch 1951–1975. *Meteorologické Zprávy*, roč. **40**, s. 135–137.
- [23] SARTOR, F. – SNACKEN, R. – DEMUTH, C. – WALCKIERS, D., 1995. Temperature, ambient ozone levels, and mortality during summer 1994, in Belgium. *Environmental Research*, roč. **70**, s. 105–113.
- [24] SOBÍŠEK, B. (ed.) et al., 1993. Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Praha, Academia. 594 s.
- [25] STEADMAN, R.G., 1984. A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, roč. **23**, s. 1674–1687.
- [26] THOMPSON, R., 1995. Complex demodulation and the estimation of the changing continentality of Europe's climate. *International Journal of Climatology*, roč. **15**, s. 175–185.
- [27] WERNER, P.C. – GERSTENGARBE, F.W. – FRAEDRICH, K. – OESTERLE, H., 2000. Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *International Journal of Climatology*, roč. **20**, s. 463–471.
- [28] WHITMAN, S. – GOOD, G. – DONOGHUE, E.R. – BENBOW, N. – SHOU, W.Y. – MOU, S.X., 1997. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. *American Journal of Public Health*, roč. **87**, s. 1515–1518.

Lektor Dr. K. Krška, CSc., rukopis odevzdán v září 2002.