

MOŽNOSTI KONSTRUKCE BUDOUCÍCH SCÉNÁŘŮ ÚMRTNOSTI SOUVISEJÍCÍ SE STRESEM Z HORKA V ČR A JEJICH OMEZENÍ

Jan Kyselý, Radan Huth

Summary

Possibilities of construction of future scenarios of heat related mortality in the Czech Republic and their limitations.

Similarly to other parts of the world, heat stress results in considerable increases and intraseasonal shifts in total mortality and mortality due to cardiovascular diseases in the Czech Republic. Potential impacts of the greenhouse gas induced climate change on heat related mortality in the Czech Republic, based on scenarios of the summer temperature increase in 2050 and simulations with a stochastic model, are discussed in this contribution. The long-term acclimatization as well as observed changes towards decreased vulnerability of populations in developed countries to heat stress are likely to moderate the impacts of future warming but the climate change is still expected to slightly enhance heat related mortality in the Czech Republic.

Úvod

Zvýšená úmrtnost a nemocnost v důsledku stresu z horka představuje jednu z hlavních oblastí dopadů klimatických extrémů na společnost. Většina úmrtí souvisí se zhoršením chronického onemocnění, nejčastěji kardiovaskulárního, mozkového cévního nebo nemoci dýchacího ústrojí. V souvislosti s očekávanou změnou klimatu v důsledku antropogenních emisí skleníkových plynů do ovzduší panují obavy ze zvýšení dopadů stresu z horka na úmrtnost v řadě oblastí světa. Např. roční počet úmrtí vyvolaných horkem ve velkoměstech USA se podle některých scénářů (Kalkstein, 1993; Kalkstein a Greene, 1997) může do poloviny 21. století několikanásobně zvýšit, a to i tehdy, pokud bude populace schopná se z velké části aklimatizovat.

Cílem tohoto příspěvku je naznačení některých otázek týkajících se dopadů případné antropogenní změny klimatu na

úmrtnost v důsledku stresu z horka v ČR a možností jejich řešení.

Data a metody

a. Data o úmrtnosti

Denní počty úmrtí v ČR poskytl Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR. Za analyzované období 1982-2000 byla k dispozici celková úmrtnost a úmrtnost na kardiovaskulární nemoci. Normálový počet úmrtí byl určen s využitím modelu, který uvažuje zjištěné dlouhodobé změny úmrtnosti a roční a týdenní cyklus; jako charakteristika úmrtnosti byla analyzována odchylka skutečného počtu úmrtí od normálového („očekávaného“) počtu úmrtí pro daný den. Metodika je obdobná jako v některých jiných pracích (Guest et al., 1999, Smoyer et al., 2000, Whitman et al., 1997). Přímé použití počtu úmrtí, u nichž je jako primární příčina uvedeno vyčerpání způsobené horkem, by bylo vzhledem k nejednotné definici nevhodné (srov. Whitman et al., 1997).

b. Klimatická data

Autoři příspěvku:

RNDr. Jan Kyselý, Ph.D., RNDr. Radan Huth, DrSc.

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Boční II 1401, 141 31 Praha 4 (email: honza@ufa.cas.cz)

Denní klimatická data za stejné období poskytli ČHMÚ. Jako reprezentativní pro území ČR byly zvoleny stanice Klatovy, Praha-Ruzyně, Hradec Králové, Brno-Tuřany a Ostrava-Mošnov; z jejich údajů byla vytvořena průměrná řada, použitá k popisu meteorologických podmínek v ČR.

Scénáře změny úmrtnosti související se stresem z horka při změně klimatu

Výběr klimatického modelu použitého pro konstrukci scénáře změny úmrtnosti v důsledku stresu z horka ve změněném klimatu byl založen na vyhodnocení schopnosti několika skupin klimatických modelů reprodukovat vlastnosti extrémních teplotních jevů i pozorovanou úmrtnost související se stresem z horka v současném klimatu. Testované modely zahrnovaly globální cirkulační modely (GCM), statistický downscaling z velkoplošných cirkulačních a teplotních polí ve volné atmosféře, aplikovaný na pozorovaná data i výstupy GCM, a stochastický generátor počasí. Rámcový popis těchto skupin modelů byl publikován v Kyselý et al. (2001).

Odhady úmrtnosti související se stresem z horka ve výstupech klimatických modelů pro současné klima byly stanoveny pomocí následujícího postupu: (1) Vztah mezi pozorovanou teplotou a odchylkou úmrtnosti od normálu je určen tak, že každému 1 °C širokému intervalu je přiřazena průměrná odchylka úmrtnosti od normálu - funkce nabývá minima pro TMAX 18 °C a je prakticky monotónně rostoucí v intervalu TMAX 18 až 36 °C. (2) Na základě výstupu klimatického modelu odpovídajícího současnému klimatu je odhadnuta úmrtnost související se stresem z horka v každém roce, a to jako suma pozorovaných odchylek úmrtnosti od normálu příslušejících dané teplotě ve všech dnech s teplotou vyšší než určitá hranice (odpovídající buď optimální TMAX, při níž je pozorována nejnižší úmrtnost, tj. 18 °C, nebo TMAX, při je-

jímž překročení je průměrná odchylka úmrtnosti od normálu kladná, tj. 24 °C; první z těchto pojetí úmrtnosti související se stresem z horka je obdobné jako v Keatinge et al., 2000 a je dále využito).

Z analyzovaných klimatických modelů se jako nejvhodnější pro účely konstrukce scénáře úmrtnosti související se stresem z horka v budoucím klimatu, bez ohledu na to, zda je úmrtnost v důsledku horka definována pro hranici 18 °C nebo 24 °C, jeví stochastický model, tzv. generátor počasí. Vytváří časové řady, které reprodukuje stochastickou strukturu pozorovaných proměnných (v našem případě TMAX, TMIN a globálního záření): jejich průměry, rozptyly, autokorelace a vzájemné korelace. Tyto řady jsou proto v dobrém souhlasu s pozorováním, a to i pokud jde o některé charakteristiky extrémních teplotních jevů. Parametry modelu je třeba modifikovat podle scénáře změny klimatu založeného na výstupech GCM.

Zde uvažované scénáře změny klimatu počítají se zvýšením průměrné teploty o (i) 0.9 °C, (ii) 1.6 °C, (iii) 2.6 °C; rozptyl teploty a korelace a autokorelace mezi TMAX a TMIN zůstávají nezměněny. Scénáře odpovídají (i) dolní, (ii) střední a (iii) horní hranici odhadu změny TMAX v ČR v období květen-září, vztahují se k roku 2050 a byly odvozeny na základě výstupů globálních cirkulačních modelů ECHAM4 a HadCM2. Zvýšení teploty je vůči období 1961-1990. Dolní odhad byl vytvořen kombinací emisního scénáře SRES-B1 (IPCC, 2001) s nízkou citlivostí klimatu, horní kombinací scénáře SRES-A2 s vysokou citlivostí klimatu, střední pak jako průměr z SRES-A2 v kombinaci s nízkou citlivostí klimatu a SRES-B1 s vysokou citlivostí klimatu.

Vztah mezi úmrtností a meteorologickými proměnnými byl aplikován pro změněné klima pomocí simulací provedených základní verzí

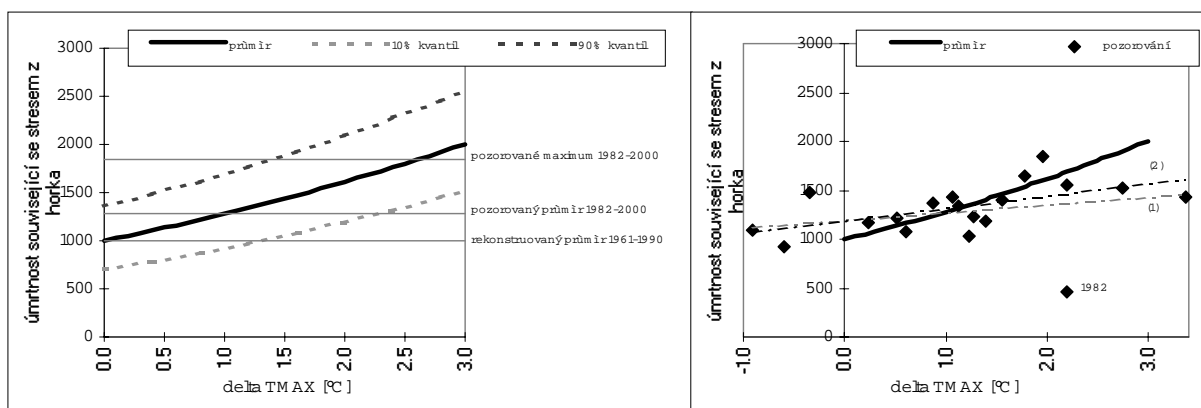
stochastického generátoru Met&Roll (Dubrovský, 1997). Závislost mezi zvýšením průměrné teploty a úmrtností v důsledku stresu z horka (určenou jako suma odchylek průměrné, v případě ii) skutečné úmrtnosti od průměrné úmrtnosti při optimální TMAX, tj. 18 °C, pro všechny dny s TMAX vyšší než tato optimální teplota) byla stanovena dvěma způsoby:

i) Pomocí stochastického modelu jsou simulovány řady TMAX o délce 1000 let pro přírůstky teploty oproti současnému (1961-1990) klimatu $\Delta TMAX = 0.0, 0.1, 0.2, \dots, 3.0$ °C. Pro každé $\Delta TMAX$ je

stanovena průměrná roční úmrtnost v důsledku stresu z horka a analyzována je její závislost na $\Delta TMAX$.

ii) Nevyužívá se stochastický model, ale pozorovaná data za období 1982-2000. Analyzována je závislost pozorované úmrtnosti v důsledku stresu z horka na průměrné teplotě období květen-září.

Vzhledem ke krátkému časovému úseku pokrytému daty je odhad ii) poměrně málo spolehlivý; jako jediný však pracuje se skutečnou úmrtností a zahrnuje tak efekty jako je aklimatizace v průběhu letní sezóny, posunutá úmrtnost apod.



Obr. 1. Odhady závislosti úmrtnosti související se stresem z horka na růstu teploty vycházející ze a) simulací pomocí stochastického modelu (vlevo), b) simulací pomocí stochastického modelu a pozorování za období 1982-2000 (vpravo). Na grafu b) jsou pozorovanými hodnotami proloženy regresní přímky, a to se zahrnutím roku 1982 (1) a s jeho vyloučením (2).

Výsledky simulací popsaných v bodě i) ukazuje obr. 1a. Rostoucí křivky znázorňují průměr a 10% a 90% kvantily rozdělení odhadnuté roční úmrtnosti v důsledku stresu z horka; proložené hranice odpovídají (odspodu) průměru rekonstruovanému pro období 1961-1990 z pozorovaných teplotních dat, skutečnému pozorovanému průměru za období 1982-2000 (kdy je TMAX zhruba o 1 °C vyšší) a maximální pozorované hodnotě za 1982-2000. Z grafu je patrné, že generátor reprodukuje průměrnou úmrtnost související se stresem z horka (pro

$\Delta TMAX = 0$ °C) bez systematické chyby. Dolnímu (střednímu, hornímu) odhadu změny klimatu k roku 2050 odpovídá zvýšení průměrné úmrtnosti o 25 (47, 84) %; pro horní scénář dosahuje průměrná úmrtnost hodnoty pozorovaného maxima za 1982-2000.

Ke srovnatelnému zvýšení úmrtnosti lze dospět i postupem, v němž je pomocí stochastického modelu simulována pouze jedna řada TMAX, např. pro $\Delta TMAX = 0.0$ °C nebo 1.5 °C (druhá hodnota odpovídá středu zkoumaného rozpětí 0 až 3 °C) a analyzována je závislost roční

úmrtnosti v důsledku stresu z horka na průměrné teplotě období květen-září. Pro dolní (střední) odhad změny klimatu vychází zvýšení úmrtnosti zhruba na 22 (52) %.

Na obr. 1b jsou výsledky simulací konfrontovány s pozorovaným vztahem mezi úmrtností související se stresem z horka a teplotou v letech 1982-2000. Průměrná TMAX za květen-září je v uvedeném období vyšší ve srovnání s 1961-1990, čemuž odpovídá vyšší průměrná úmrtnost. Z grafu, který naznačuje rovněž nárůst úmrtnosti při zvyšující se průměrné teplotě, vybočuje odlehlá hodnota pro rok 1982. S jejím zahrnutím vychází nárůst průměrné úmrtnosti při dolním (středním, horním) odhadu změny klimatu a za předpokladu lineární závislosti na 6 (11, 17) %; pokud ji vyloučíme, dostáváme zvýšení o 10 (18, 27) %. Důvody, proč se hodnota pro rok 1982 výrazně vymyká ze zbytku souboru, spočívají především v efektech intrasezónního posunu úmrtnosti, proměnlivosti prahové teploty, při jejímž překročení dochází k dopadům na úmrtnost, v průběhu sezóny, i zanedbání komplexnosti vztahu mezi teplotou (a počasím obecně) a lidským zdravím. Efekt posunu úmrtnosti (Kyselý a Kříž, 2003) a v menší míře i aklimatizace vysvětlují, proč ani teplá letní období nebyla v tomto roce většinou provázána výraznějšími dopady na úmrtnost.

Uvedený případ roku 1982 poukazuje na komplexnost vztahů mezi počasovými podmínkami a lidským zdravím, kterou není možné naznačeným jednoduchým přístupem zachytit. Rozdíly mezi výsledky simulací (bod i) a odhady z pozorování (bod ii) rovněž pramení v podstatné míře ze zanedbání složitosti těchto vztahů. Zjištěná rozpětí (6 až 22 % pro dolní odhad změny klimatu, 11 až 47 % pro střední, 17 až 84 % pro horní) vymezují hranice, v nichž se pravděpodobné dopady změny klimatu na úmrtnost související se stresem z horka v ČR budou pohybovat. Vzhledem

k tomu, že v odhadu založeném na simulacích pomocí stochastického modelu jsou zanedbány některé efekty projevující se v pozorovaných datech, budou skutečné dopady změny klimatu pravděpodobně ležet spíše u dolních z uvedených odhadů.

Závěr

Pravděpodobným scénářem změny úmrtnosti v důsledku stresu z horka v budoucím (teplejším) klimatu je její mírné zvýšení. Definujeme-li úmrtnost související se stresem z horka jako sumu odchylek úmrtnosti od průměrné úmrtnosti při optimální teplotě (TMAX = 18 °C) pro všechny dny s teplotou vyšší než tato optimální teplota, nepředpokládáme-li změněnou schopnost aklimatizace na vysoké teploty (která by vedla ke zmírnění dopadů) a odhlédneme-li od měnící se demografické struktury společnosti (zhoršení dopadů v důsledku stárnutí populace), změn v dostupnosti a kvalitě lékařské péče (pravděpodobně zmírnění dopadů) a dalších vlivů, často s opačnými znaménky a obtížně kvantifikovatelných, lze odhadnout očekávané zvýšení úmrtnosti související se stresem z horka při nárůstu průměrné teploty o 1 °C na 8 až 33 %. Rozpětí scénářů změny průměrné teploty k roku 2050 založených na simulacích klimatických modelů spolu s různými odhady změny úmrtnosti související se stresem z horka na jednotkové zvýšení průměrné teploty vede k rozpětí možné změny úmrtnosti v důsledku stresu z horka k roku 2050 o 7 % (dolní odhad změny klimatu i citlivosti populace) až 84 % (horní odhad změny klimatu i citlivosti populace). V žádném případě se tedy ani při nejpesimističtější scénáři nejedná o několikanásobné zvýšení (srov. Kalkstein a Greene, 1997).

Množství chyb a nejistot vstupujících do hry při konstrukci scénářů změny klimatu a jejich dopadů je stále velké a ani uve-

dené rozpětí je nemůže zachycovat v plné míře. Mezi nejpodstatnější patří neurčitosti při volbě předpokládaného emisního scénáře, v budoucích koncentracích skleníkových plynů, v citlivosti klimatu na změnu koncentrací skleníkových plynů, v regionální a sezónní proměnlivosti klimatické změny atd. Zanedbána je zde rovněž přirozená proměnlivost klimatu. V případě dopadů změny klimatu na úmrtnost v důsledku stresu z horka bude podstatnou roli vedle schopnosti aklimatizace, změn věkové skladby společnosti a dalších obtížně odhadnutelných společensko-ekonomických trendů hrát účinnost preventivních a adaptačních opatření.

V letech 2002 a 2003 bylo v mezinárodní literatuře publikováno několik prací zabývajících se úmrtností související se stresem z horka (např. Davis et al., 2002, 2003; Donaldson et al., 2003), které přinesly nové poznatky mající důsledky mj. pro odhad budoucího vývoje. Poprvé bylo ukázáno dlouhodobé zmírňování dopadů horkých období na úmrtnost ve vyspělých částech světa (USA, západní Evropa), k němuž dochází navzdory pozorovanému růstu teploty i měnící se věkové skladbě populace. Svou roli na tomto poklesu hraje zlepšování lékařské péče, větší rozšíření klimatizace, aplikace varovných systémů (zejména v USA) i

další vlivy; vzhledem k pozorovanému zvyšování teploty se zde však zřejmě odráží také dlouhodobá schopnost aklimatizace organismu na teplotní podmínky. Schopnost této aklimatizace má zásadní význam pro skutečné scénáře změny úmrtnosti v důsledku stresu z horka v budoucím (pravděpodobně teplejším) klimatu.

Vzhledem k poznatkům z těchto studií je téměř jisté, že skutečný dopad změny klimatu na úmrtnost související se stresem z horka v ČR bude blízký dolnímu odhadu z výše uvedeného rozpětí, za předpokladu, že tato změna bude probíhat dostatečně pomalu. Obdobné stanovisko, pokud jde o změny úmrtnosti související se stresem z horka při změně klimatu, zastávají i autoři práce Keatinge et al. (2000). Pro rok 2050 (při středním odhadu změny klimatu) pokládáme za nejpravděpodobnější nárůst úmrtnosti v ČR v důsledku stresu z horka o 10-15 %. Toto relativně optimistické zjištění rozhodně neznamená, že by mělo být omezeno úsilí dopady změny klimatu na úmrtnost způsobenou stresem z horka minimalizovat. V teplejším klimatu se také častěji budou vyskytovat extrémně horké letní sezóny podobné létu 2003, v nichž dopady na úmrtnost výrazně vybočují z dlouhodobého průměru (Keatinge, 2003).

Poděkování: Práce vznikla v rámci projektu 205/01/D040 podpořeného Grantovou agenturou ČR.

Literatura:

Davis, R.E. - Knappenberger, P.C. - Novicoff, W.M. - Michaels, P.J., 2002: Decadal changes in heat-related human mortality in the eastern United States. *Clim. Res.*, **22**, 175-184.

Davis, R.E. - Knappenberger, P.C. - Novicoff, W.M. - Michaels, P.J., 2003: Decadal changes in summer mortality in U.S. cities. *Int. J. Biometeorol.*, **47**, 166-175.

Donaldson, G.C. - Keatinge, W.R. - Näyhä, S., 2003: Changes in summer temperature and heat-related mortality since 1971 in North Carolina, South Finland, and Southeast England. *Environ. Res.*, **91**, 1-7.

- Dubrovský, M., 1997: Creating daily weather series with use of the weather generator. *Environmetrics*, **8**, 409-424.
- Guest, C.S. - Wilson, K. - Woodward, A. - Hennessy, K. - Kalkstein, L.S. - Skinner, C. - McMichael, A.J., 1999: Climate and mortality in Australia: retrospective study, 1979-1990 and predicted impacts in five major cities in 2030. *Clim. Res.*, **13**, 1-15.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 881 s.
- Kalkstein, L.S., 1993: Health and climate change: direct impacts in cities. *Lancet*, **342**, 1397-1399.
- Kalkstein, L.S. - Greene, J.S., 1997: An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of climate change. *Environ. Health Perspect.*, **105**, 84-93.
- Keatinge, W.R. - Donaldson, G.C. - Cordioli, E. - Martinelli, M. - Kunst, A.E. - Mackenbach, J.P. - Näyhä, S. - Vuori, I., 2000: Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. *Br. Med. J.*, **321**, 670-673.
- Keatinge, W.R., 2003: Deaths in heat waves. *Br. Med. J.*, **327**, 512-513.
- Kyselý, J. - Huth, R. - Dubrovský, M., 2001: Simulace extrémních teplotních jevů globálními cirkulačními modely, statistickým downscalingem a stochastickým generátorem. *Meteorol. Zpr.*, **54**, 73-82.
- Kyselý, J. - Kříž, B., 2003: Vysoké letní teploty a úmrtnost v ČR v letech 1982-2000. *Epidemiol. Mikrobiol. Imunol.*, **52**, 105-116.
- Smoyer, K.E. - Kalkstein, L.S. - Greene, J.S. - Ye, H., 2000: The impacts of weather and pollution on human mortality in Birmingham, Alabama and Philadelphia, Pennsylvania. *Int. J. Climatol.*, **20**, 881-897.
- 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. *Amer. J. Pub. Health*, **87**, 1515-1518.