

Desaťročie extrémov

Preukázateľne vyšší počet extrémnych prípadov počasia pozorovaný na celom svete v období posledného desaťročia sa stal živnou pôdou neutíchajúcich diskusií medzi odborníkmi aj laikmi o tom, či tento fenomén má skutočne nejaký súvis s globálnym otepľovaním. V článku ukážeme, že v prípade niektorých typov extrémov, neustále pribúdajú vedecké dôkazy potvrdzujúce príčinný vzťah medzi ich častejším výskytom a najmä intenzitou, a progresívnymi zmenami základných fyzikálnych parametrov zemskej atmosféry. Ten potvrdzujú nielen empirické údaje, ale predovšetkým, vyplýva z elementárnej fyziky atmosféry.

Posledná dekáda „dala ľuďstvu zabrat“

Z pohľadu celkového počtu a výraznosti poveternostných extrémov bolo počasie v priebehu posledných dvoch rokov hodnotené ako mimoriadne. Len v minulom roku (2011) sa na území Spojených štátov amerických vyskytlo 14 meteorologických situácií, z ktorých každá spôsobila škody v hodnote minimálne jednej miliardy amerických dolárov. Americký národný úrad pre výskum oceánov a atmosféry (NOAA) uvádzal vo svojich oficiálnych tlačových vyhláseniach, že išlo o „rok plný meteorologických extrémov“. Len ich samotným vymenovaním a popisom by sme zaplnili niekoľko stránok, preto spomenieme len tie najzávažnejšie. V pamäti väčšiny z nás určite ešte ostávajú spomienky na sériu ničivých tornád z apríla a mája 2011, ktorá sa do histórie zapísala nielen rekordným počtom zaznamenaných veterných smrští, ale aj bezprecedentným rozsahom spôsobených škôd. V priebehu apríla 2011 bolo zaznamenaných 753 tornád (predošlý rekord z mája 2003 bol 542), z ktorých hneď niekoľko dosiahlo najvyšší stupeň intenzity (EF5; počas apríla a mája 2011 bolo celkovo zaznamenaných 5 tornád sily EF5; za rok sa v priemere vyskytne jedno). V niektorých štátoch na severovýchodnom pobreží USA spadlo za obdobie od januára do októbra 2011 najviac zrážok v histórii meteorologických meraní. K tejto rekordnej bilancii významnou mierou prispel aj hurikán Irene, ktorý sa regiónom prehnal v auguste 2011.

Ani zvyšku sveta nebol v minulom roku dožičený oddych od ničivých prejavov počasia. Za všetky môžeme spomenúť najmä rekordné zrážky a následné povodne v austrálskom štáte Queensland, Japonsku či Južnej Kórei, alebo naopak historické sucho v povodí čínskeho veľtoku Jang-c' -ťiang. Extrémne sucho neobišlo v roku 2011 ani západnú Európu, či dokonca juhovýchodné regióny Slovenska. Rok predtým sa pozornosť svetových médií sústredila najmä na mimoriadnu vlnu horúčav v západnom Rusku, ktorá si podľa posledných odhadov vyžiadala minimálne 56 000 obetí a obrovské strany poľnohospodárskej produkcie (ročná produkcia pšenice poklesla v Rusku o viac ako 30%). Bez povšimnutia neostali ani rekordné povodne v Pakistane, ktoré zasiahli celú jednu pätinu plochy štátu a 20 miliónov ľudí pripravili o strechu nad hlavou. Podľa viacerých zdrojov, vrátane OSN, išlo o jednu z najväčších humanitárnych kríz v doterajšej histórii ľudstva. Akokoľvek sa však roky 2010 a 2011 zdali byť z pohľadu počasia abnormálne, pri detailnejšom pohľade na celú prvú dekádu 21. storočia zistíme, že nešlo, žiaľ, o nič výnimočné.

Čím je to, že posledné desaťročie, veľmi pravdepodobne najteplejšie za posledné tisícročie, bolo na extrémny počasia tak nápadne hojné? Existuje vôbec nejaký súvis medzi pozorovanými trendmi globálnej teploty a rastom počtu extrémov, ktorý by bol navyše

fyzikálne obhájitelný? Ak sa bude planéta aj naďalej otepľovať, na čo všetko sa musíme pripraviť, aby sme dokázali extrémnemu počasiu v budúcnosti vzdorovať a minimalizovať jeho nepriaznivé dôsledky? Nie ste to však len vy či napríklad zástupcovia samospráv, ktorí si otázky podobného charakteru kladú takmer neustále. Aj samotní klimatológovia majú čo robiť, aby dokázali odpovedať na čo i len zlomok týchto otázok. Odpovede sa síce nikdy nehľadali ľahko, no klimatológ má už v súčasnosti k dispozícii celý rad veľmi sofistikovaných vedeckých metód, ktoré mu poskytujú určitý obraz o tom, ako sa menili extrémny doposiaľ a k akým zmenám pravdepodobne dôjde v najbližšej budúcnosti. Zatiaľ čo o historickej perspektíve extrémov nám dokáže niečo povedať štatistická analýza, predpovede budúceho vývoja nie je možné pripraviť bez solídnejších klimatických modelov, rešpektujúcich principiálnu fyzikálnu podstatu klimatického systému Zeme.

Trochu zo štatistiky

Počasia a klíma sú najčastejšie popisované súborom meteorologických a klimatologických prvkov a ich charakteristík (veličín; napr. teplota vzduchu, zrážky, počet dní s maximálnou dennou teplotou nad 25°C, atď.). V rámci analýzy extrémov si všimame nielen časový vývoj a frekvenciu výskytu zriedkavo sa vyskytujúcich hodnôt, ale aj ich „polohu“ v rámci distribúcie (distribučnej krivky) všetkých nameraných hodnôt daného prvku. Za extrém sa zvyčajne považuje tá hodnota, ktorá je nad (alebo pod) a priori určeným prahom nachádzajúcim sa v blízkosti horného (alebo dolného) rozmedzia pozorovaných hodnôt. Pre zjednodušenie sa všetky poveternostné a klimatické extrémne javy označujú jednotne ako „klimatické extrémny“. Distribučná krivka, ktorá vo všeobecnosti definuje pravdepodobnosť výskytu konkrétneho intervalu hodnôt sa v štatistike charakterizuje pomocou niekoľkých popisných parametrov (napr. aritmetický priemer, parameter tvaru a rozsahu distribučnej krivky, atď.). Stačí zmena jediného z uvedených parametrov na to, aby došlo k podstatnej deformácii alebo posunu celej distribučnej krivky jedným alebo druhým smerom. Tieto zmeny majú v konečnom dôsledku zásadný vplyv na nárast alebo pokles pravdepodobnosti výskytu extrémnych hodnôt, ktoré sa nachádzajú na tzv. chvostoch (okrajoch) rozdelenia. Zatiaľ čo vo vnútri rozdelenia (oblasť medzi dolným a horným kvartilom – nachádza sa tu 50 % všetkých hodnôt) sú zmeny frekvencie výskytu pri týchto posunoch takmer zanedbateľné (rádovo do niekoľkých %), hodnoty pravdepodobnosti nad 95., 98, prípadne 99. kvantilom (percentilom) sa môžu meniť doslova skokovo o desiatky či stovky percent. A toto je zásadný problém zmien výskytu extrémnych hodnôt v podmienkach meniacej sa nestacionárnej klímy (globálne otepľovanie). Ak napríklad dochádza k zvyšovaniu priemernej teploty vzduchu, celá distribučná krivka sa posúva smerom doprava, čo sa prejavuje nárastom počtu „teplých“ extrémov a naopak poklesom počtu tých chladných na opačnom konci. Uvedená úvaha nie ani zďaleka len produktom nejakého štatistického teoretizovania, tento fenomén potvrdzujú aj reálne namerané údaje. A čo viac, nemusíme sa obmedzovať len na teplotu vzduchu. Tento predpoklad obstoja aj pri ďalších meteorologických prvkoch, aj keď treba pripomenúť, že vzťah medzi teplotou vzduchu a zrážkovými extrémami je trochu zložitejší. Jednoduchá fyzikálna úvaha nad Clausius-Clapeyronovou rovnicou nás však privedie k empiricky dokázateľnému predpokladu, podľa ktorého oteplenie o každý 1°C vedie k nárastu vlhkosti vzduchu (obsahu vodnej pary v atmosfére) až o 7 %, čo zvyšuje nielen pravdepodobnosť výskytu extrémne vysokých úhrnov zrážok, ale prispieva aj k intenzívnejším procesom tvorby a vypadávanie zrážok. Vlhšia atmosféra je nositeľom väčšieho množstva latentnej energie, ktorá sa uvoľňuje pri skvapalňovaní vodnej pary. Konečným výsledkom môžu byť silnejšie a deštruktívnejšie búrky či hurikány.

Štatistika vs. modelovanie klimatického systému

Štatistika nám umožňuje nielen presne vymedziť, ktoré hodnoty študovaného meteorologického prvku je už možné považovať sa extrémny, a ktoré naopak ešte nie, ale navyše prináša aj odpoveď na často kladenú otázku, či súčasný počet poveternostných extrémov je významne vyšší ako v prípade, kedy by k zmene klímy nedochádzalo. Inak povedané, či je dlhodobý vývoj a zmeny frekvencie extrémov možné vysvetliť prostredníctvom pozorovaných trendov klimatických prvkov. Štatistika je mocná čarodejka, keď viete čo s ňou, no sama o sebe už nedokáže vysvetliť fyzikálnu príčinu pozorovaných zmien, prípadne či tieto zmeny možno vnímať skôr ako dôsledok antropogénne zosilneného skleníkového efektu alebo prirodzenej premenlivosti globálnej klímy. V tomto smere sú oveľa užitočnejšie klimatické modely (tiež prepojené cirkulačné modely – GCMs). Tie sú schopné simulovať nielen časový vývoj fyzikálnych vlastností klimatického systému Zeme, ale aj všetky známe fyzikálne procesy (toky látok a energie, výmena tepla medzi oceánom a atmosférou, uhlíkov cyklus, atď.), ktoré sa zásadným spôsobom podieľajú na formovaní klimatických pomerov zemských hemisfér, kontinentov či vybraných regiónov. Okrem toho, modely umožňujú simulovať odozvu celého klimatického systému Zeme ako aj jednotlivých jeho subsystémov (atmosféra, oceány, ľadovce, atď.) na zmeny základných klimatotvorných faktorov – napríklad slnecnej aktivity, chemizmu atmosféry, vulkanickej činnosti, a pod. Výpočtová technika dnes už umožňuje spúšťať tisícky modelových simulácií takmer súbežne, čím sa výrazne skraca nielen výpočtový čas, ale predovšetkým sa redukuje neistoty odhadov, napr. budúceho vývoja klímy (čím máme k dispozícii viac výsledkov, tým máme aj lepšie informácie o možnom rozsahu predpokladaných zmien a ich príčin). Treba si však uvedomiť, že nech sú už modely akokoľvek prepracované a komplexné, stále majú určité obmedzenia, ktoré vyplývajú z ich zatiaľ nedostatočnej schopnosti simulovať niektoré typy poveternostných extrémov (napr. búrok).

Extrémy I: Vlny horúčav

V poslednom desaťročí sme boli svedkami hneď niekoľkých rekordných a deštruktívnych vln horúčav, ktoré zasiahli mnohé časti sveta. Čo je však možno ešte horšie, niektoré odborné štúdie naznačujú, že ich extrémnosť ako aj výskyt by pravdepodobne nedosiahli pozorovaný rozsah, nebyť globálneho otepľovania. Len pre predstavu uvedieme zopár základných údajov na úvod. V roku 2003 zasiahla západnú Európu jedna z najextrémnejších vln horúčav za posledné storočie, pričom v konečnom bilancovaní si vyžiadala minimálne 40 000 ľudských životov (horný odhad: 70 000). Leto, počas ktorého sa vyskytla bolo v Európe vôbec najteplejším za posledných aspoň 500 rokov. V roku 2007 pre zmenu zasiahla mimoriadna vlna horúceho počasia Grécko. Priemerná letná teplota v Aténach presiahla dlhodobý priemer z obdobia 1961-1990 o 3,3 °C (3,7-násobok štandardnej odchýlky). Asi netreba ani pripomínať, že v tom istom roku sme rekordne vysoké teploty zaznamenali aj u nás na Slovensku. Dramaticky sa vyvíjali aj horúčavy a následné požiare v Austrálii vo februári 2009, či v centrálnom Rusku júli a auguste 2010. Okrem viac ako 56 000 obetí si ruské horúčavy vyžiadali aj obrovské materiálne a ekonomické straty (napr.: produkcia obilnín v lete 2010 sa prepadla o viac ako 30 %). Jedna z posledných dlhotrvajúcich a deštruktívnych vln horúčav zasiahla v minulom roku aj juh a juhozápad Spojených štátov amerických. Nejde však len o výskyt a dôsledky takto extrémnych vln horúčav, štatistické analýzy skutočne potvrdzujú, že počet tzv. „teplých“ extrémov výrazne rastie na celej Zemi. Približne 73 % pevnín zaznamenalo významný nárast počtu tzv. teplých nocí (10 % najteplejších) v období

1951-2003, počet rekordov maximálnej dennej teploty je na území USA a Austrálie v súčasnosti dva krát vyšší než počet rekordov minimálnej teploty, a približne 30 % rekordov maximálnej teploty v Európe je možné pripísať pôsobeniu globálneho otepľovania. Okrem toho, **celková dĺžka vln horúčav sa v západnej Európe v priebehu 20. storočia zdvojnásobila**. V južnej Európe, a to najmä v oblasti Stredomoria, sú zmeny ďaleko výraznejšie. Vo východnom Stredomorí len od 60. rokov minulého storočia vzrástli všetky sledované charakteristiky vln horúčav šesť- až osemnásobne! Ak sa však posunieme do oblasti mesačných extrémov, dlhodobé trendy sú dokonca ešte nápadnejšie. V porovnaní s dennými údajmi sú mesačné charakteristiky extrémov poznačené menšou premenlivosťou, čo sa okrem iného prejavuje aj v ich tesnejšej závislosti od globálnych zmien teploty. Extrémne teplé letá sa napríklad v súčasnosti pravidelne vyskytujú približne nad celou jednou desatinou povrchu pevnín, v porovnaní s rozsahom okolo 0,1-0,2 % v rokoch 1951-1980. Modelové simulácie s pozorovanými trendmi veľmi úzko korešpondujú. Dokazujú však aj to, že riziko výskytu vln horúčav podobnej magnitúdy ako v roku 2003 sa v priebehu 20. storočia minimálne zdvoj- až štvornásobilo, a to hlavne v dôsledku antropogénne zesilneného skleníkového efektu.

Extrémy II: Mimoriadne zrážky

Všeobecné závery výskumu extrémnych zrážok naznačujú, že v priebehu posledného desaťročia nielenže vzrástol počet mimoriadnych zrážkových situácií, ale navyše väčšiu časť z nich podmienila klimatická zmena. Od roku 2000 sme, a to nielen v Európe, zaznamenali relatívne vysoký počet extrémne vysokých a v mnohých prípadoch aj rekordných úhrnov zrážok. Spomedzi mnohých stoja za spomenutie napríklad rekordné úhrny z Nemecka z augusta 2002 (312 mm zrážok za 24 hodín v oblasti Zinnwald-Georgenfeld – najvyšší denný úhrn zrážok v Nemecku), či rekordné mesačné zrážky z júla 2007 v Anglicku a Walese (najdaždivejší júl od začiatkov meraní v roku 1766). Aby toho nebolo málo, o dva roky neskôr zaznamenali vo Veľkej Británii nový rekord denného úhrnu zrážok – v oblasti Seathwaite spadlo za 24 hodín 316 mm vody (316 litrov na m²). Rekordné zrážky v inak na zrážky chudobnom strednom a severnom Pakistane spôsobili v júli 2010 najhoršie povodne v celej známej histórii tejto krajiny. Najvyššie zrážky najmenej od roku 1900 postihli v závere roku 2010 aj severovýchodnú Austráliu, nasledované vôbec najvlhšou jarou od začiatku meteorologických pozorovaní. Žiaľ, nezaobišlo sa to bez rovnako rekordných povodní v štáte Queensland, ktoré zaplavili 1,3 mil. km² územia a spôsobili miliardové škody. (Nedávna štúdia austrálskych klimatológov prišla k záveru, že až ¼ extrémnych zrážok z decembra 2010 bola zapríčinená abnormálne vysokou teplotou morskej vody v oblasti severnej a severovýchodnej Austrálie.) Zatiaľ čo severozápad kontinentu bol zatopený vodou, juhovýchod Austrálie bojoval s najsuchším obdobím dažďov v histórii. Za zmienku určite stoja aj minuloročné extrémne zrážky v Japonsku v septembri 2011 spôsobené tajfúnom Talas (v oblasti stredného Japonska spadlo až 1625 mm za 72 h; predošlý rekord: 1322 mm). Aj keď štatistická analýza extrémnych zrážok naráža na celý rad úskalí – predovšetkým ide o nedostatočne hustú monitorovaciu sieť pozemných meteorologických staníc, vzhľadom na lokálnosť mimoriadnych zrážok – všeobecne možno v období posledných 100 rokov potvrdiť rast extrémnych zrážok (úhrny nad 99 % kvantilom) v oblasti miernych šírok. Na území Spojených štátov vzrástli až o 33 %, a na niektorých miestach aj o viac ako 100 %. Pozoruhodný je aj nárast extrémnosti zrážok v zimnom období – **v Európe dokonca až 8-násobne za posledných 150 rokov**, najmä v dôsledku zmien cirkulačných podmienok. Tak

hodinové intenzity zrážok ako aj charakteristiky vlhkosti vzduchu potvrdzujú nárast obsahu vodnej pary v zemskej atmosfére, a to až o 4 % v období od začiatku 70. rokov).

Stopa globálneho otepľovania?

Naskytá sa však otázka, či je možné v uvedených trendov vidieť „otlačok“ ľuďmi podmieneného globálneho otepľovania? V roku 2011 vyšla štúdia, podľa ktorej zosilnený skleníkový efekt atmosféry podstatne zvyšuje riziko výskytu jesenných extrémnych zrážok a povodní v oblasti Anglicka a Walesu, podobných tým z roku 2000, o minimálne 20 % (s 90 % istotou) až 90 % (s 66 % istotou). Ďalšia štúdia sa dopracovala k zisteniu, že nad približne dvoma tretinami severnej pologule prispeli ľudské emisie CO₂ k zosilneniu a intenzifikácii denných a 5-denných maxim zrážok (v období druhej polovice 20. storočia).

Extrémy III: Búrky

V poslednom desaťročí bolo na Zemi zaregistrovaných niekoľko prípadov výskytu mimoriadnych tropických cyklón (TC), ktoré zaujali nielen svojou intenzitou a deštruktívnou silou, ale aj oblasťou, v ktorej sa vyskytli. Zrejme netreba ani pripomínať, že v prípade akejkoľvek štatistickej analýzy počtu a intenzity TC je potrebné byť pri interpretácii dosiahnutých výsledkov nanajvýš obozretný, a to najmä kvôli nedostatočne kvalitným a krátkym časovým radom pozorovaní týchto atmosférických fenoménov. Z pohľadu výskytu TC bol zaujímavý najmä rok 2004, kedy prvýkrát v známej histórii bol pozorovaný hurikán v Atlantickom oceáne južne od rovníka, pri východných brehoch Brazílie. Rok na to sme nad severným Atlantikom a Karibským morom zaznamenali vôbec najvyšší počet TC (28), z ktorých 15 dosiahlo silu hurikánu. Jeden z nich, Wilma, sa dokonca stal najsilnejším „atlantickým“ hurikánom v období od začiatku meteorologických pozorovaní. Rekordy však padali aj v iných častiach svetových oceánov. Tak napríklad v roku 2007 sa nad arabským morom vytvoril zatiaľ najsilnejší cyklón (Gonu) v známej histórii, ktorý následne zapríčinil najväčšiu prírodnú katastrofu v histórii Ománu. Nárast intenzity a teda aj deštruktívnej sily TC pozorovaný od začiatku 80. rokov je možné z veľkej časti vysvetliť najmä otepľovaním povrchových vrstiev tropických oceánov, no nezanedbateľnú úlohu v tomto zohráva aj ochladzovanie stratosféry (vrstva atmosféry ležiaca nad troposférou). Výraznejší vertikálny teplotný gradient medzi spodnou troposférou a spodnou stratosférou vedie k intenzívnejším procesom spojených s konvekciou (organizované výstupné pohyby vzduchu v dôsledku ktorých vzniká oblačnosť a následne aj zrážky), čo sa priamo prejavuje v náraste intenzity TC. Aby to však nebolo až tak jednoduché, v dôsledku zmien cirkulácie nad väčšou časťou tropických oceánov dochádza k rastu rýchlosti výškového prúdenia (rastie tzv. vertikálny strih vetra), čo na druhej strane vedie k zhoršovaniu podmienok vzniku TC v týchto oblastiach. Ako vidíme, máme tu dve protichodne pôsobiace sily, ktorých kombinovaný účinok pravdepodobne povedie v budúcnosti k situáciám, kedy celkový počet TC nebude zásadne vyšší ako dnes (dokonca môže byť aj nižší), no ak už nejaká TC vznikne, bude mať veľký potenciál dosiahnuť najvyšší stupeň intenzity (5). Na margo tohto bloku sa ešte patrí pripomenúť, že rast sily TC neregistrujú len pozemné pozorovania, ale potvrdzujú ho aj družicové merania. K pozoruhodným zmenám však dochádza aj mimo tropických šírok. V období posledných 25 rokov došlo k významnému posunu oboch polárnych frontálnych zón smerom k zemským pólom – dráhy mimotropických cyklón tak na severnej pologuli prechádzajú stále severnejšie, na južnej pologuli analogicky stále južnejšie od svojich pôvodných priemerných trajektórií (prejavuje sa to aj posunom polárneho jet-streamu bližšie

k pólom). Tento fenomén súvisí predovšetkým s rozpínaním tropickej cirkulácie (Hadleyho cirkulačnej bunky). Tropická vzduchová hmota tak doslova vytláča vzduch miernych širok bližšie k obom pólom. Z pohľadu početnosti mimotropických cyklón sú zaujímavé výsledky najmä z oblasti južnej pologule, kde aj napriek poklesu ich celkového počtu významne rastie od roku 1970 počet hlbokých cyklón (menej ako 980 hPa). Podobný vývoj je možné potvrdiť aj na severnej pologuli.

Záver

Ako vidieť, výsledky štatistických analýz, ale predovšetkým analýz založených na výstupoch klimatických modelov potvrdzujú prostý fakt, že v podmienkach teplejšej klímy významne rastie počet a amplitúda tak teplotných ako aj zrážkových extrémov (niektoré z logických dôvodov zaznamenali pokles, ako napríklad počet chladných extrémov). Fyzikálne zdôvodniteľný je aj predpoklad, že tento trend bude pokračovať aj v budúcnosti v podmienkach zvyšovania globálnej teploty. K obdobnému záveru/predpokladu dospela aj 4. hodnotiacia správa IPCC z roku 2007 - *v prípade teplotných a zrážkových extrémov na kontinentoch je potrebné aj v budúcnosti počítať s ich ďalším nárastom (90% pravdepodobnosť), a to najmä v dôsledku ľudmi podmieneného globálneho otepľovania (menšia istota panuje v prípade extrémov ako napr. TC alebo sucho)*. Ako však vieme, klimatická zmena nepredstavuje ani zďaleka len otepľovanie atmosféry. Ide o komplex zložitých zmien, ktoré sú navyše medzi sebou pospájané prevažne nelineárnymi väzbami, čo znamená, že zmena jedného subsystému (veličiny) môže viesť k oveľa výraznejšej a rýchlejšej zmene ďalšieho (dobrým príkladom môže byť predpoklad výrazného rastu mimoriadnych úhrnov zrážok v dôsledku zvýšenia teploty o 1°C – nie je to však len dôsledok exponenciálnej závislosti maximálneho obsahu vodnej pary od teploty vzduchu). Okrem toho, niektoré zmeny v klimatickom systéme Zeme môžu pôsobiť aj tak, že celkovo prispievajú k utlmovaniu extrémov (ako napríklad vplyv vertikálneho strihu vetra na početnosť TC). Aj napriek nejednoznačnosti a neistotám, ktoré panujú okolo niektorých typov extrémov, vo všeobecnosti sa vedecké analýzy zhodujú na tom, že extrémnosť počasia a klímy, vyjadrená celkovým počtom extrémov bez ohľadu na typ, narastá a veľmi pravdepodobne bude rásť aj v budúcnosti. To, či im budeme vedieť vzdorovať, bude závisieť nielen od ich výraznosti a frekvencie, ale aj od našej celkovej zraniteľnosti, resp. pripravenosti im čeliť.

Jozef Pecho, Alexander Ač

Literatúra:

World Meteorological Organization Weather Extremes in a Changing Climate: Hindsight on Foresight (WMO, 2011).

World Meteorological Organization Current Extreme Weather Events (WMO, 2010); dostupné na www.wmo.int/pages/mediacentre/news/extremeweathersequence_en.html.

Hong, C. et al. Roles of European blocking and tropical–extratropical interaction in the 2010 Pakistan flooding. Geophys. Res. Lett. 38, L13806 (2011).

IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis (eds Solomon, S. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2007).

Rahmstorf, S. & Coumou, D. Increase of extreme events in a warming world. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108, 17905–17909 (2011).

Trenberth, K. E. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 47, 123–138 (2010).

Alexander, L. V. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.* 111, D05109 (2006).

Meehl, G. A. et al. Relative increase of record high maximum temperatures compared to record low minimum temperatures in the US. *Geophys. Res. Lett.* 36, L23701 (2009).

Lean, J. L. & Rind, D. H. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Res. Lett.* 35, 1–6 (2008).

Schönwiese, C. D., Walter, A. & Brinckmann, S. Statistical assessments of anthropogenic and natural global climate forcing. An update. *Meteorol. Z.* 19, 3–10 (2010).

Foster, G. & Rahmstorf, S. Global temperature evolution 1979–2010. *Environ. Res. Lett.* 6, 044022 (2011).

Stott, P. A. et al. Detection and attribution of climate change: A regional perspective. *WIREs Clim. Change* 1, 192–211 (2010).

Stott, P. A., Stone, D. A. & Allen, M. R. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432, 610–614 (2004).

Otto, F. E. L. et al. Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave. *Geophys. Res. Lett.* 39, L04702 (2012).

Min, S. K. et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature* 470, 378–381 (2011).

Pall, P. et al. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature* 470, 382–386 (2011).

Luterbacher, J. et al. European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science* 303, 1499–1503 (2004).

Robine, J. M. et al. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biol.* 331, 171–178 (2008).

Schär, C. et al. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature* 427, 332–336 (2004).

Founda, D. & Giannakopoulos, C. The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece — A typical summer in the future climate? *Glob. Planet. Change* 67, 227–236 (2009).

Karoly, D. The recent bushfires and extreme heat wave in southeast Australia. *Bull. Aust. Meteorol. Oceanogr. Soc.* 22, 10–13 (2009).

Wergen, G. & Krug, J. Record-breaking temperatures reveal a warming climate. *EPL* 92, 30008 (2010).

- Della-Marta, P. M. et al. Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *J. Geophys. Res.* 112, D15103 (2007).
- Kuglitsch, F. G. et al. Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. *Geophys. Res. Lett.* 37, L04802 (2010).
- Becker, A. & Grünewald, U. Flood risk in central Europe. *Science* 300, 1099 (2003).
- Groisman, P. Y. A. et al. Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.* 18, 1326–1350 (2005).
- Lenderink, G. & van Meijgaard, E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geosci.* 1, 511–515 (2008).
- Trenberth, K. E. & Shea, D. J. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophys. Res. Lett.* 33, 1–4 (2006).
- Emanuel, K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436, 686–688 (2005).
- Elsner, J. B., Kossin, J. P. & Jagger, T. H. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature* 455, 92–95 (2008).
- Knutson, T. R. et al. Tropical cyclones and climate change. *Nature Geosci.* 3, 157–163 (2010).
- Bender, F. A-M., Ramanathan, V. & Tselioudis, G. Changes in extratropical storm track cloudiness 1983–2008: Observational support for a poleward shift. *Clim. Dynam.* <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1065-6> (2011).
- Archer, C. L. & Caldeira, K. Historical trends in the jet streams. *Geophys. Res. Lett.* 35, L08803 (2008).
- Wang, X. L., Swail, V. R. & Zwiers, F. W. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: Comparison of ERA-40 with NCEP–NCAR reanalysis for 1958–2001. *J. Clim.* 19, 3145–3166 (2006).
- Ulbrich, U., Leckebusch, G. C. & Pinto, J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. *Theor. Appl. Climatol.* 96, 117–131 (2009).
- Barriopedro, D. et al. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332, 220–224 (2011).
- Beniston, M. The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys. Res. Lett.* 31, L02202 (2004).
- Kysely, J. Recent severe heat waves in central Europe: How to view them in a long-term prospect? *Int. J. Climatol.* 30, 89–109 (2010).
- Feudale, L. & Shukla, J. Influence of sea surface temperature on the European heat wave of 2003 summer. Part I: An observational study. *Clim. Dynam.* 36, 1691–1703 (2011).
- McTaggart-Cowan, R. et al. Analysis of Hurricane Catarina (2004). *Mon. Weather Rev.* 134, 3029–3053 (2006).

