

Diera v globálnom otepľovaní, alebo s čím modely donedávna nerátali

Marek Kučera, Dávid Ščepka, Jozef Pecho, František Radi

Aj keď klimatická zmena prinesie nad rozsiahle regióny Zeme veľké problémy s otepľovaním a zintenzívňovaním zrážok, predsa sa môžu vyskytnúť menšie oblasti, kde meniac sa cirkulácia môže vygenerovať dosť neočakávaný efekt v podobe celkového ochladenia. Jedna z týchto oblastí sa bude nachádzať len neďaleko Európy - v severnom Atlantiku, pričom postupne by mohla spôsobiť ochladenie najmä v krajinách západnej a severnej Európy. Nečakané zmeny v severnom Atlantiku prináša v posledných rokoch hlavne enormné topenie sladkého grónskeho ľadovca a arktického morského ľadu (v porovnaní so slanými vodami južných šírok). Vedci čoraz viac upriamujú pozornosť na najväčšiu klimatickú anomáliu zápornej teploty na severnej pologuli - tzv. diery v globálnom otepľovaní. Voda zo sladkého topiaceho sa ľadu severných šírok vytlačá od severu teplejší Golský prúd smerom na juh oveľa výraznejšie, ako predpovedali klimatické modely ešte nedávno. Vďaka otepľujúcej sa Arktíde a posunu chladnejších oceánskych povrchových vôd juhozápadne od Islandu smerom na juh, sa nad severným Atlantikom hromadia studené vzduchové hmoty. Nedávne štúdie odhaľujú, že v najbližších desaťročiach už môže byť letná Arktída bez ľadu a zväčšujúca sa záporná klimatická anomália v severnom Atlantiku môže výrazne ovplyvniť už aj Európu. Najväčšie ochladenie modely očakávajú v severozápadnej Európe, kde tento paradox globálneho otepľovania (zahraníční autori začali používať termín „Global warming hole“) dorazí najskôr.

Úvod

Na úvod treba zdôrazniť, že globálne otepľovanie a klimatická zmena už v súčasnosti prináša do väčšiny regiónov Zeme značné problémy - zmeny amplitúdy dráh cyklón, tzv. jet-streamu sa aj v miernom pásme vyskytuje viac teplotných a zrážkových extrémov, dochádza k atmosférickému blokovaniu a tlakové útvary sú značne perzistentnejšie ako v minulosti (FRANCIS a VAVRUS, 2012, PETOUHKOV a SEMENOV, 2010, GERTENGARBE a WERNER, 2005). Pribúda vln tepla, periód intenzívnych zrážok, silných búrok, vďaka vyšším teplotám trápí mnohé regióny aj napriek rastúcim trendom zrážok kvôli výraznejšiemu výparu hydrologické a pôdne sucho.

Do konca 21. storočia sa podľa stredných scenárov počíta na Slovensku s oteplením až o 2 - 4 °C (MELO et al. 2013, MEINSHAUSEN et al. 2011, COLLINS et al. 2013). V severných zemepisných šírkach budú zmeny klímy ešte výraznejšie - vďaka pozitívnym spätným väzbám hrozí v niektorých častiach Arktídy oteplenie až o 5 až 10 °C. To jednak spôsobí enormné topenie morského arktického a pevninského grónskeho ľadu, no jednak aj deformity dráh cyklón - keďže nad severnými šírkami sa bude otepľovať niekoľkokrát rýchlejšie ako nad južnými, redukovaný teplotný gradient môže nahrávať atmosférickému blokovaniu, kedy pobyt jedného tlakového útvaru nad určitým regiónom môže trvať značne dlhšie ako kedysi.

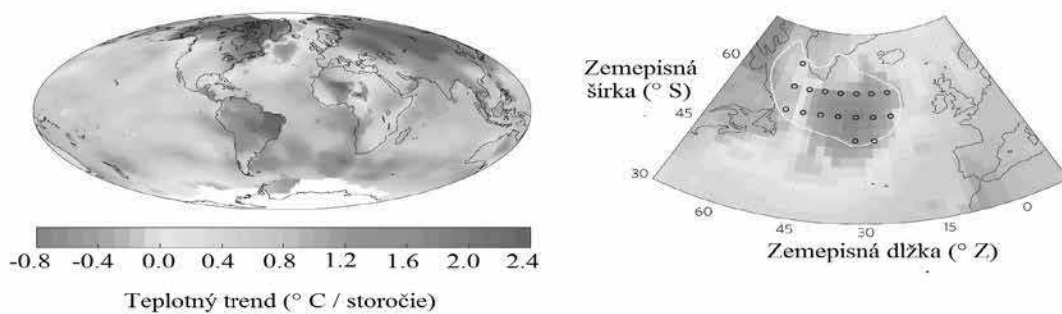
Takmer 90 % regiónov Zeme tak do konca storočia počíta s výrazným otepľovaním, ktoré v meradle desaťročí až tisícročí nemá obdoby (IPCC 2013) - teplotné a zrážkové extrémny budú mať celosvetovo obrovské dopady na hospodárstvo, dopravu, spoločnosť a ekonomiku a ľudské zdravie (MOBERG a JONES 2005). Napriek tomu sa očakáva, že regionálne sa objavia určité anomálie - akési negatívne spätné väzby, ktoré sa budú snažiť klimatický systém vrátiť smerom k pôvodnému stavu. Takouto spätnou väzbou môže byť po istý čas aj nárast albeda, z dôvodu nárastu rozlohy snehovej pokrývky na kontinentoch severnej pologule (roztopený Severný ľadový oceán bude najbližšie približne 2 až 3 desaťročia enormné množstvá vlhkosti, ktorá spôsobí, že najmä kanadská a sibírska snehová pokrývka paradoxne zaznamená na jeseň a zimu miernu expanziu).

Ešte zaujímavejšími negatívnymi spätnými väzbami, hrajúcimi proti všeobecnému trendu globálneho otepľovania však môžu byť tie, ktoré budú spojené s regionálnymi ochladeniami - akési „diery v globálnom otepľovaní“. A síce - v čerstvej literatúre autori už začínajú operovať s týmto termínom (Global warming hole) v súvislosti s najväčšou takouto dierou na severnej pologuli, v severnom Atlantiku. Ide o najväčší región, kde sú od začiatku meteorologických meraní zaznamenané klesajúce trendy teploty vzduchu, navyše, na miestne pomery s výrazným ochladzovaním počítajú aj

projekcie minimálne do roku 2100. Čo je ešte zaujímavejšie, nedávne výskumy naznačujú, že táto anomália sa zo severného Atlantiku bude postupne, v priebehu 21. storočia, približovať k brehom Atlantiku, až nakoniec ochladenie, možno aj citeľné, pocíti najmä severozápadná Európa. Je pravdepodobné, že zmeny cirkulácie spojené s touto anomáliou môžu v neskorších fázach klimatickej zmeny viac - či menej zasahovať aj nad kontinentálne časti Európy (aj keď celkový trend výrazného otepľovania u nás, tak ako napr. na Britských ostrovoch, by nemal byť ohrozený).

Už koncom roka 2015 vyšli správy, že Golský prúd v dôsledku topenia grónskeho ľadovca a Arktídy zoslabol na najnižšiu úroveň od roku 900 n. l. (Rahmstorf et al. 2015). V posledných rokoch sa v tejto súvislosti začína objavovať aj rozsiahla anomália teploty povrchovej vody v priestore severného Atlantiku - juhozápadne od Islandu sa začína hromadiť jazerom chladnej a na povrchu sladkej vody, čo následne ochladzuje aj prízemné vrstvy atmosféry. Táto tzv. diera v globálnom otepľovaní (Global warming hole), tvorená vznikajúcimi zápornými teplotnými anomáliami povrchových vôd severného Atlantiku a hromadiacimi sa chladnými vzduchovými hmotami v tomto regióne, súvisí vo veľkej miere práve so zmenami v Arktíde. Arktída sa otepľuje v posledných desaťročiach niekoľkokrát rýchlejšie ako južnejšie šírky, čo je jednak spojené s odtokom veľkých mäs chladných

Diera v globálnom otepľovaní (Global warming hole) v období 1901 - 2013



Obrázok 1 Trend teploty vzduchu pevnín a oceánov vo svete v období 1901 – 2013 s dôrazom na najvýraznejšiu zápornú teplotnú anomáliu v severnom Atlantiku, tzv. diery v globálnom otepľovaní (RAHMSTORF et al. 2015)

a sladkých povrchových hmôt smerom na juh, no jednak so zmenami cirkulácie a zmenami smeru a intenzity prúdenia vzduchových hmôt (niekedy sa hovorí aj o tzv. „meandrovanií jet streamu“, ale aj o posune akčných centier stacionárnych tlakových útvarov akými sú aj azorská anticyklóna či islandská cyklóna). Práve v severnom Atlantiku konfigurácia týchto zmien vyvoláva najrozsiahlejší paradox klimatickej zmeny – rozsiahle územie v rámci prízemných vrstiev atmosféry a povrchových vôd Atlantického oceána, kde sa od začiatku 20. storočia, odkedy máme presnejšie merania, vôbec neotepluje. Naopak, stále čím ďalej tým intenzívnejšie a na väčšom území sa ochladzuje. Ide o najrozsiahlejšiu zápornú teplotnú anomáliu na severnej pologuli oproti všeobecnému trendu globálneho otepľovania a zároveň jednu z najvýraznejších negatívnych spätných väzieb, ktoré pôsobia proti celkovému výraznému globálnemu trendu vzostupu teplôt. Aj keď globálne otepľovanie prinesie v najbližších desaťročiach nesporné celosvetové problémy spojené s rastom teploty a intenzity zrážok (do konca storočia väčšina projekcií očakáva oteplenie až od 2 až 4 °C), regionálne sa môžu vyskytnúť aj menšie oblasti, kde sa globálne otepľovanie paradoxne môže prejavovať aj ochladzovaním. Jedna z potenciálne najpravdepodobnejších ochladzujúcich oblastí podľa nedávnych výskumov môže prekvapiť najmä severozápadnú Európu.

V posledných desaťročiach a najmä rokoch už boli zaznamenané nespochybniteľné signály, že záporná teplotná anomália spojená s diery v globálnom otepľovaní, začala, aj keď zatiaľ celkom nenápadne, presúvať svoje chápadlá k

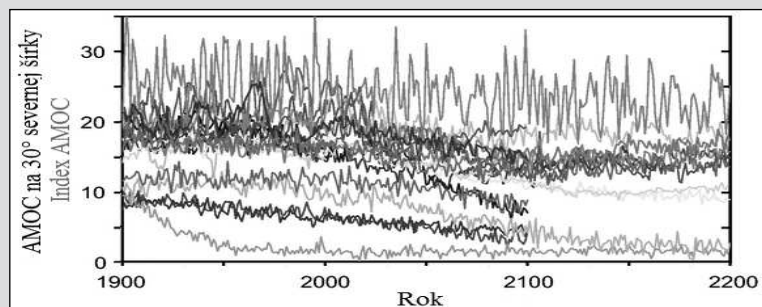
brehom západnej Európy. Klimatické modely počítajú aj v najbližších desaťročiach s čoraz väčším dopadom anomálie na počasie v Európe a najmä pobrežné oblasti od Portugalska, cez Biskajský záliv, Britské ostrovy, Benelux až po Škandináviu a Pobaltie, pričom tieto zmeny nastávajú už v súčasnosti skôr ako sa ešte nedávno čakalo. Podľa výstupov čerstvých prác by sa dokonca mohlo ochladiť regionálne až o 5 °C (RAHMSTORF et al. 2015).

V období po vrchole letného minima rozlohy arktického morského ľadu (v jesenných mesiacoch) je táto anomália najmä po roku 2000 spojená aj s nenápadným posunom dráhy cyklón (stormtrack) smerom na juh. To môže byť spojené s niektorými už zaznamenanými trendami v Európe na jeseň, kedy sa vyskytujú aj v našich šírkach čoraz častejšie mesiace, kedy niektoré teplotné charakteristiky hlásia paradoxne ochladzujúci alebo neutrálny trend. Zaznamenaný bol v centrálnej Európe aj nárast oblačnosti na jeseň a pokles udalostí singularity babieho leta. Identifikované už boli aj vplyvy diery v globálnom otepľovaní na klímu

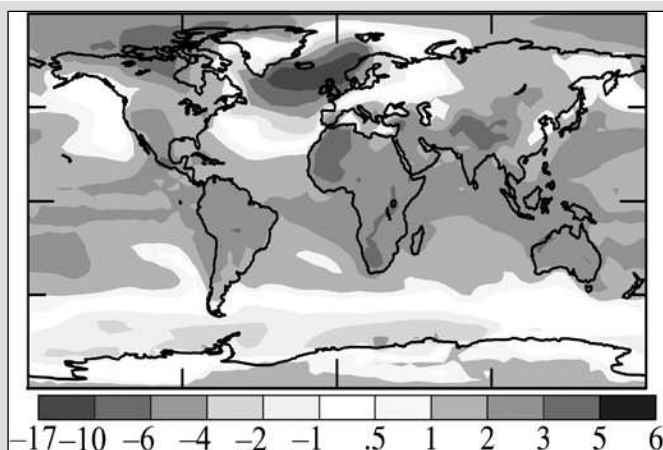
a počasie v Severnej Amerike - zmeny v severnom Atlantiku sú podľa nedávnych štúdií spojené najmä s ochladzujúcim efektom na celom východnom pobreží Severnej Ameriky (MEEHL et al., 2012).

Kolaps Golského prúdu je rýchlejší ako sa čakalo, v 21. storočí budeme svedkami ochladenia najmä v severnej a západnej Európe

Silný potenciál morského ľadu v Arktíde ovplyvňovať globálnu klímu cez atmosférickú cirkuláciu (ako odozvu na arktický zosilňujúci efekt) je všeobecne uznávaný. HERMAN a JOHNSON (1978) poskytli prehľad štúdií zameraných na súvislosti variácií arktického morského ľadu a diaľkových väzieb od začiatku 20. storočia. HILDEBRANDSSON (1914) prvý predpokladal, že môžu existovať korelácie medzi zimnými podmienkami na severnej pologuli, najmä v Európe a ľadu vo Východogrónskom mori počas predchádzajúceho leta. WIESE (1924)



Obrázok 2 Pozorované a očakávané zoslabenie Atlantického meridiálneho prúdu (indexov AMOC) do roku 2200 na 30°N (podľa scenárov SRES A1B) (SCHMITTNER et al., 2005)



Obrázok 3 Očakávaná projekcia poklesu teploty vzduchu nad severozápadnou Európou a severným Atlantikom s príčinou v diere v globálnom otepľovaní - výraznom topení grónskeho ľadovca a arktického morského ľadu na rok 2080 podľa scenára A1B (HANSEN, 2016)

už predložil dôkazy naznačujúce vzťah medzi ľadom vo Východogrónskom a Nórskom mori a neskoršiu frekvenciu tlakových níží a zrážok v severnej Európe. WALKER (1947) uvádza vzťah v okolí New Foulandu a Islandu so severoeurópskym tlakom vzduchu, SCHELL (1956, 1970) pozoroval korelácie medzi okrajovými časťami arktického morského ľadu a teplotou a tlakom v Európe. Nakoniec DEFANT (1961) poukázal na pozitívnu spätnú väzbu medzi rozlohou morského ľadu a atmosférického tlaku v Arktíde. Početné štúdie riešia vzťah arktického zaľadnenia a severoatlantickej termohalinnej cirkulácie. MCBEAN et al. (2005) definuje THC ako globálny obeh v oceánoch, ktorý prepravuje veľké množstvo tepla k pólom cez teplú a veľmi slanú vodu na povrchu a studenú a menej slanú vodu v hĺbkach smerom k rovníku. Celkové rozloženie povrchovej hustoty oceánskej vody, povrchovej salinity a povrchovej teploty určuje výsledný charakter THC. Severoatlantická THC v Grónskom, Irmingerovom a Labradorskom mori (BROECKER 1990) je citlivá na hustotu povrchovej vody produkovanú teplotnými a slanostnými fluktuáciami, čiastočne spôsobenými odlivom čerstvej vody z Arktídy.

Ak by v blízkej budúcnosti globálny systém oceánskeho prúdenia (alebo inak termohalinná cirkulácia - THC, ktorej vetvou je aj Golfský prúd) spomalil, alebo sa úplne zastavil v dôsledku stále rýchlejšieho topenia ľadu v Grónsku, Arktíde i Antarktíde, globálne otepľovanie by to síce nezvrátilo, no niektoré oblasti by sa mohli veľmi rýchlo ochladiť. Následky by v euro-atlantickom sektore

pocítila hlavne severozápadná Európa. Na Britských ostrovoch by sa mohlo ochladiť o 5 °C, v Laponsku a na Špicbergoch dokonca až o 10 °C.

Globálne otepľovanie okrem iného zvyšuje úhrn zrážok v polárnych oblastiach, najmä vo forme snehu. Sneh „živí“ polárne pevninské ľadovce, putujúce k pobrežiu, kde sa roztápajú a znižujú salinitu studených morských prúdov. Táto väzba je však pomerne pomalá. Okrem nej však existujú aj rýchlejšie a dôležitejšie mechanizmy znižovania slanosti morskej vody v priestore severozápadného Atlantiku. Popri intenzívnejších zrážkach, ktoré vypadávajú priamo na morskú hladinu, je to zvýšený prítok sladkej vody z riek, nižší výpar (v porovnaní s tropickými oblasťami), no hlavne spomínaná deštrukcia grónskeho ľadovca. Práve posledný menovaný mechanizmus RAHMSTORF et al. (2015) označili za najpravdepodobnejšiu príčinu možného zoslabenia Atlantickej meridionalnej cirkulácie, (AMOC).

Kolaps tejto cirkulácie by mohol prebiehať aj náhle (náhle spomalenie alebo zastavenie), úplný kolaps AMOC a Golfského prúdu je však v najbližších desaťročiach len málo pravdepodobný (pravdepodobnosť pod 10 percent). Treba si však uvedomiť, že väčšia časť týchto prognóz je založená na fyzikálnych a klimatických modeloch, ktoré nie vždy správne popisujú chovanie morskej cirkulácie. Čo je však pozoruhodné, najnovšie štúdie (HANSEN et al 2016, Obr. 3) v súvislosti s „dierou v globálnom otepľovaní“ očakávajú možné výrazné zmeny v priľahlej severoatlantickej časti Európy - projekcie do konca 21. storočia

začínajú počítať s výrazným ochladzovaním v severozápadnej Európe od Portugalska, cez Britské ostrovy, Benelux až po Škandináviu a Pobaltie.

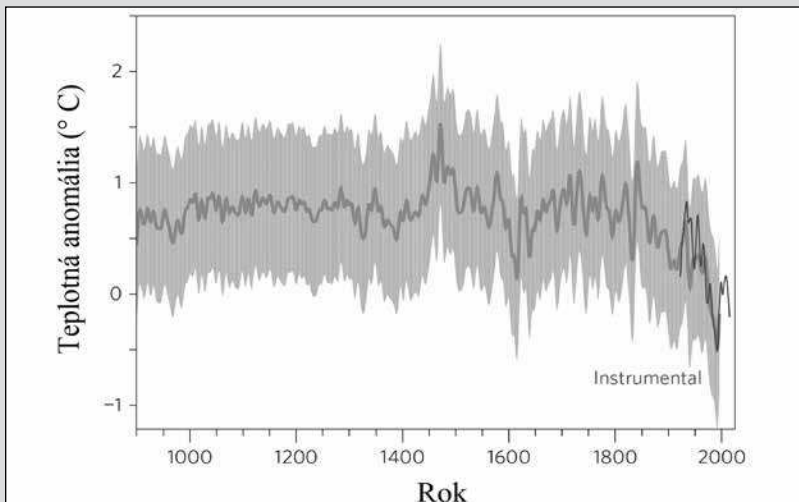
Sladká voda z Arktídy a Grónska odtláča Golfský prúd smerom na juh stále viac

Ochladenie spojené s dierou v globálnom otepľovaní sa tak vyskytlo na najmenej vhodnom mieste celého Atlantického oceánu a môže priniesť dramatické zmeny. Možné sú najmä zmeny prúdenia vody v oceánoch, ktoré môžu následne ovplyvniť zmeny počasia naprieč celou Zemou, no najmä v Európe. Väčšina klimatických modelov očakáva oslabenie THC v teplejšej klíme s veľkým topením arktického ľadu (LEMKE et al. 2007). Významnou hnacou silou morskej vody je jej teplota a salinita, preto aj miestne zmeny môžu spôsobiť nestabilitu celého THC. Platí, že chladnejšia, ale aj slanšia voda majú vyššiu hustotu (najväčšiu hustotu má voda pri 4 °C). Málo slaná voda s teplotou 2 °C tak môže mať rovnakú hustotu ako najslanšia morská voda s teplotou 20 °C.

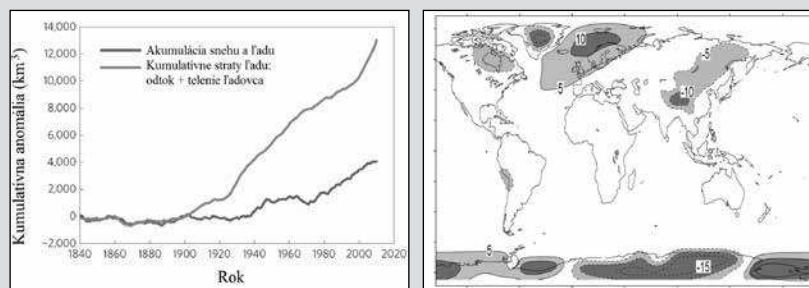
Ak by sa vody s pozmenenými teplotami a salinitou stretali v oblasti dotyku Labradorského a Golfského prúdu, Labradorský prúd by za projektovaných zmien neklesal pod teplý Golfský ako doteraz, ale odtlačil by ho na južnejšiu dráhu. Ide hlavne o oblasť stretu teplej a na soľ bohatej vody Golfského prúdu s chladnejšími a hustejšími vodami, ktoré sem pritékajú z Arktídy, najmä Grónska. (DRIJFHOUT et al. 2012).

Ak by z nejakého dôvodu hustota vody Golfského prúdu vzrástla, prípadne by poklesla rýchlosť jeho prúdenia, veľká časť teplej vody by sa ponárala do hlbších častí oceánu oveľa južnejšie ako doteraz, prípadne by bol celý prúd presmerovaný na južnejšiu dráhu rastúcim prítokom vody z Arktídy. Namiesto toho, aby Golfský prúd pokračoval k Britským ostrovom a pobrežiu Nórska, v novom režime by končil niekde na pobreží Portugalska. Veľká časť severozápadnej Európy by sa tak výrazne ochladila.

Aj keď s úplným kolapsom veľkých rozmerov zatiaľ nepočítajú ani tie najpessimistickejšie scenáre budúceho vývoja (IPCC počíta maximálne s 54 % zoslabením Golfského prúdu do roku 2100), HANSEN (2016) a RAHMSTORF (2015) poukazujú na fakt, že situácia v severnom Atlantiku sa mení oveľa rýchlejšie ako sa očakávalo.

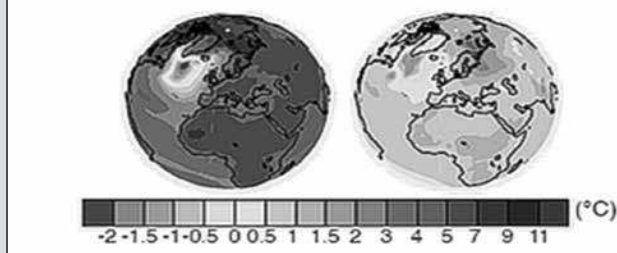


Obrázok 4 Historická rekonštrukcia teploty povrchu oceánu v oblasti „chladnej anomálie“ južne od Islandu v období od roku 900 do začiatku 20. storočia. Od roku 1901 sú k dispozícii prístrojové merania teploty povrchu oceánu (RAHMSTORF et al. 2015)



Obrázok 5 Vľavo: Bilancia hmoty grónskeho ľadovcového štítu v období rokov 1840 až 2013 – modrá krivka: celkové kumulatívne straty ľadu [v km³] prostredníctvom odtoku vody a telenia ľadovcov do mora (odlamovanie ľadu do mora); červená krivka: celková akumulácia snehu na povrchu Grónska – výrazné zrýchlenie straty ľadu možno pozorovať hlavne po roku 1920 a 2000 (RAHMSTORF et al. 2015); Vpravo: Odchýlka regionálnej povrchovej teploty vzduchu od zonálneho priemeru, teda teploty „priemerovanej“ pre danú rovnobežku - výrazná kladná teplotná anomália v severnom Atlantickom oceáne je spôsobená prítomnosťou severných vetiev Gólfského prúdu (RAHMSTORF 2006).

Možné teplotné odozvy v období 2081 - 2100 podľa scenárov RCP8.5 (s vyššími emisiami) a RCP2.6 (s nižšími emisiami)



Obrázok 6 Očakávané krajné scenáre RCP8.5 (vľavo) a RCP2.6 (vpravo) a im prislúchajúce zmeny teploty vzduchu pre obdobie 2081 – 2100 so zrejmu dierou v globálnom otepľovaní (COLLINS et al. 2013)

RAHMSTORF et al. (2015) zistili na základe paleoklimatologických rekonštrukcií a modelových simulácií úzku súvislosť medzi ochladzovaním oblasti južne od Islandu a rýchlosťou prúdenia Gólfského prúdu. Okrem toho, že ochladzovanie je najrýchlejšie za posledných 1 100 rokov, výsledky ukazujú aj na najpravdepodobnejšiu príčinu významného zoslabenia morskej cirkulácie v Atlantickom oceáne. Keďže obdobie jej výrazného spomalenia a súčasne aj najrýchlejšieho ochladenia severozápadného Atlantiku po roku 1970 nápadne koreluje s nárastom množstva sladkej vody pritekajúcej zo severu, hlavnú príčinu autori vidia v rýchlom topení polárnych ľadovcov v Grónsku a Arktide.

V období rokov 1961 – 1995 sa množstvo sladšej ľadovcovej vody v severnom Atlantiku zvýšilo v porovnaní s prvou polovicou 20. storočia o celých 19-tisíc kilometrov kubických, pričom Grónsko prispelo asi 10 percentami tohto objemu. Podiel Grónska však od roku 2000 prudko rastie, a odhaduje sa, že už do roku 2025 sa do Atlantického oceánu rozleje ďalších viac ako 10 tisíc km³ sladkej vody.

Už mierne zoslabnutie termohalinnej cirkulácie môže mať v najbližších desaťročiach závažné následky (prudšie a intenzívnejšie zimné cyklóny či ekologické dôsledky narušenia potravinových reťazcov v oceánoch). Projekcie do konca 21. storočia začínajú zohľadňovať tieto zmeny čoraz viac a diera v globálnom otepľovaní sa stáva čoraz výraznejšou v projekciách očakávaných teplôt (COLLINS et al., 2013 Obr. 6).

Ochladenie môže prísť najprv na jeseň (babieho leta bude menej), potom sa dostavia chladnejšie zimy

Už dávnejšie štúdie (KYSĚLÝ a HUTH 2006; CAHYNOVÁ a HUTH 2009), ktoré skúmali zmenu synoptických podmienok v stredoeurópskom priestore, najmä v Českej republike, poukázali na výrazný klesajúci trend výskytu anticyklónálnych situácií na jeseň, pričom za ochladzovanie na jeseň môžu v našej oblasti podľa autorov práve zmeny v cirkulácii. Aj pri našich štúdiách (napr. KUČERA a PECHO 2014) sa potvrdilo, že na Slovensku zažívame čoraz menej situácií s bábim letom.

Podľa našich hypotéz, posun Gólfského prúdu smerom na juh, hromadenie chladnejšieho vzduchu čoraz južnejšie a

posun teplejších vzduchových hmôt do južnejších šírok nad severným Atlantikom, hlavne na jeseň, teda po vrcholení topenia arktického ľadu, vplyva na polohu frontálnej zóny v euroatlantickom priestore. Dráha cyklón v euroatlantickom sektore (tzv. „storm track“) sa aj vďaka zmenám v Arktíde a severnom Atlantiku najmä v jesennom období zvyklo po roku 2000 vychyľovať viac smerom na juh ako obvykle.

Južnejšie situovaný polárny front si to z Atlantiku v posledných rokoch na jeseň často zamieril rovno nad Európu, čo prinášalo častejšie cyklonálne počasie s oblačnosťou a zrážkami a častejšími ochladeniami ako by sme čakali. Zatiaľ sú tieto zmeny badateľné len vo forme istých signálov a pomerne nevýrazných odoziev, hlavne okolo októbra, no v ďalších desaťročiach, kedy budú zásoby arktického ľadu na konci leta úplne a Grónska do značnej miery roztopené, sa toto ochladzovanie môže najmä na sever a na západ od nášho územia presúvať z jesene aj na zimné mesiace. Možno preto nebolo náhodou, že posledné dlhšie, až 4-mesačné obdobie s podpriemernými teplotami, sme naposledy zažili na jeseň a začiatkom zimy 2007 (september, október, november a december 2007), pričom aj uplynulý zimný polrok 2016/2017 sa najmä od októbra do januára niesol v duchu chladnejšieho počasia.

Záver

Klimatická zmena si pre nás prichystala prekvapenia, s ktorými sme my klimatológovia, ale ani nedávne klimatické modely doteraz veľmi nerátali. Arktický zosilňujúci efekt („Arctic amplification“) so sebou okrem výraznejšieho meandrovania jet-streamu a zväčšovania teplotných a zrážkových extrémov, prináša aj veľa viac, či menej očakávaných pozitívnych a negatívnych spätných väzieb, medzi ktorými je aj vplyv rýchlo sa topiacej Arktídy na vzduchové a oceánske hmoty v priestore Európy a severného Atlantiku. Diera v globálnom otepľovaní môže v najbližších desaťročiach prekvapiť a oslabený Golfský prúd môže priniesť ochladenie najmä v západnej a severnej Európe skôr ako sa čakalo. Najohrozenejšou oblasťou týchto zmien v Európe budú azda Britské ostrovy, no tieto cirkulačné zmeny budú okrajovo viac či menej zasahovať od severozápadu aj do nášho regiónu. Je pravdepodobné, že tieto zmeny zažije už súčasná generácia.

Literatúra a pramene

BROECKER, W.S., 1990. A salt oscillator in the glacial Atlantic? 1: the concept. *Paleoceanography* 5, 469–477.

CAHYNOVÁ M., HUTH R., 2009. Changes of atmospheric circulation in central Europe and their influence on climatic trends in the Czech Republic, *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 1-2, pp. 57-68.

COLLINS M., KNUTTI R., ARBLASTER J., DUFRESNE J.-L., FICHEFET T., FRIEDLINGSTEIN P., GAO X., GUTOWSKI W. J., JOHNS T., KRINNER G., SHONGWE M., TEBALDI C., WEAVER A. J., WEHNER M., 2013. *Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds. Cambridge University Press, 1029-1136, doi:10.1017/CBO9781107415324.024.

DEFANT, A., 1961. *Physical Oceanography, Vol. 1.* MacMillan. 728 pp.

DRIJFHOUT, S., OLDENBORGH, G.J. AND CIMATORIBUS, A., 2012. Is a decline of AMOC causing the warming hole above the North Atlantic in observed and modeled warming patterns?, *J. Climate*, 25, 8373-8379, 2012.

FRANCIS, J. A., VAVRUS, S. J., 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06801, doi:10.1029/2012GL051000.

GERSTENGARBE F. W. A WERNER P. C., 2005. *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowski.* PIK Report 100, pp. 153.

HANSEN J., SATO M., HEARTY P., RUEDY R., KELLEY M., MASSON-DELMOTTE V., RUSSELL G., TSELIODIS G., CAO J., RIGNOT E., VELICOGNA I., TORMEY B., DONOVAN B., KANDIANO E., VON SCHUCKMANN K., KHARRECHA P., LEGRANDE A. N., BAUER M., A LO K. W., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3761-3812, doi:10.5194/acp-16-3761-2016.

Herman G. F., Johnson W. T., 1978. The sensitivity of the General Circulation to Arctic sea ice boundaries: a numerical experiment. *Monthly Weather Review* 106, 1649–1664.

HILDEBRANDSSON H. H., 1914. *Queques recherches sur les centres d'action*

de l'atmosphère. *Kungl Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar* 51, 3–16.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC.*

KUČERA, M., PECHO, J., 2014. Priestorová a časová variabilita extrémov teploty vzduchu na Slovensku a ich vzťah k cirkulačným podmienkam v priestore strednej Európy. *Geografická revue*, Katedra geografie, geológie a krajinej ekológie, č. seriálu: 10.1.2014, ISSN: 1336-7072, 26 s.

KYSELÝ J., HUTH R., 2006. Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theor Appl Climatol* 85:19–36.

LEMKE, P. a kolektív, 2007. Observations: Changes in snow, ice and frozen ground. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 337–383.

MCBEAN G., ALEKSEEV G., CHEN D., FØRLAND E., FYFE J., GROISMAN P.Y., KING R., MELLING H., VOSE R., WHITFIELD P. H., 2005. *Arctic climate: past and present. Arctic climate impact assessment. Scientific Report.* Cambridge University Press.

MEEHL G.A., ARBLASTER J.M., BRANSTATOR G., 2012. Mechanisms contributing to the warming hole and the consequent U.S. east-west differential of heat extremes. *Journal of Climate*, vol 25, no. 18, pp. 6394 - 6408. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00655.1.

MEINSHAUSEN M., SMITH S. J., CALVIN K., DANIEL J. S., KAINUMA M. L. T., LAMARQUE J.-F., MATSUMOTO K., MONTZKA S. A., RAPER S., RIAHI K., THOMSON A., VELDERS G. J. M. D., VAN VUUREN, D. P. P., 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change.* doi:10.1007/s10584-011-0156-z .

MELO M., LAPIN M., KAPOLKOVÁ H., PECHO J., KRUŽICOVÁ A., 2013. *Climate Trends in the Slovak Part of the Carpathians. In book: The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*, Chapter: Climate Trends in the Slovak Part of the Carpathians, Springer-Verlag, pp. 131-150, 01/2013; DOI:10.1007/978-3-642-12725-0_10 ISBN: 978-3-642-12724-3.

MOBERG A., JONES P., 2005. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and wes-

- tern Europe, 1901–99. *International Journal of Climatology* 25: 1149–1171.
- PETOUKHOV, V., SEMENOV, V., 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 115 (2010).
- RAHMSTORF S., 1997. Risk of sea-change in the Atlantic. *Nature*, 388, 825–826.
- RAHMSTORF S., 2006. Thermohaline Ocean Circulation. In: *Encyclopedia of Quaternary Sciences*, Edited by S. A. Elias. Elsevier, Amsterdam.
- RAHMSTORF, S., BOX, J. E., FEULNER, G., MANN, M. E., ROBINSON, A., RUTHERFORD, S., AND SCHAFFER-NICHT, E. J., 2015. *Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean Overturning circulation*, *Nature Clim. Change*, publ. online 23 March doi:10.1038/NCLIMATE2554, 2015.
- SCHELL I. I., 1956. Interrelations of Arctic ice with the atmosphere and the ocean in the North Atlantic-Arctic and adjacent areas. *Journal of Meteorology* 13, 46–58.
- SCHELL I. I., 1970. Arctic ice and sea temperature anomalies in the northeastern north Atlantic and their significance for seasonal foreshadowing locally and to the eastward. *Monthly Weather Review* 98, 833–850.
- SCHMITTNER A., LATIF M., SCHNEIDER B., 2005. Model Projections of the North Atlantic thermohaline circulation of the 21st century assessed by observations. *Geophysical Research Letters* 32 (2005), No. 23, [doi:10.1029/2005GL024368]
- WALKER G., 1947. Arctic conditions and world weather. *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Society* 73, 226–256.
- WERNER P. C., GERSTENGARBE F. W., FRAEDRICH K., OESTERLE H., 2000. Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *Int J Climatol* 20: 463–471.
- WIESE W., 1924. Polareis un Atmosphärische Schwankungen. *Geograf Ann* 6, 273–299.

Diera v globálnom otepľovaní – prinesie napokon do Európy ochladenie? (alebo s čím modely donedávna nerátali...)

Marek Kučera , Dávid Ščepka, Jozef Pecho, František Radi

Abstrakt

Enormné topenie sladšieho arktického morského ľadu a grónskeho ľadovca prináša v posledných rokoch nečakané zmeny v severnom Atlantiku - vedci čoraz viac upriamujú pozornosť na najväčšiu klimatickú anomáliu zápornej teploty na severnej pologuli, tvoriacu v severnom Atlantiku. Voda zo sladkého topiaceho ľadu zo severných širok vytláča od severu teplejší Golský prúd smerom na juh oveľa výraznejšie, ako predpovedali klimatické modely ešte nedávno. Vďaka otepľujúcej sa Arktíde, no aj vďaka príspevku posunu chladnejších oceánskych povrchových vôd na juh, sa navyše sa nad severným Atlantikom hromadia studené vzduchové hmoty. Ďalej na juh sa preto presúva, najmä na jeseň (po maxime topenia arktického a grónskeho ľadu), aj frontálna zóna, čo v jesenných mesiacoch prináša v posledných rokoch čoraz častejšie ochladenia v Európe. Nedávne štúdie odhaľujú, že v najbližších desaťročiach už môže byť letná Arktída bez ľadu a záporná klimatická anomália môže výrazne ovplyvniť už aj európske zimy. Najväčšie ochladzovanie sa očakáva najmä v západnej a severnej Európe v jesennom a zimnom období, kde tento paradox globálneho otepľovania, spôsobený dierou v globálnom otepľovaní v severnom Atlantiku (zahraniční autori začali používať čerstvý termín „global warming hole“) dorazí vďaka rozširovaniu sa tejto anomálie najskôr.

Autori

Marek Kučera

Katedra fyzickej geografie a geoinformatiky, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava

Bc. Dávid Ščepka

Katedra politológie, Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Trenčín

Mgr. Jozef Pecho, PhD.

Oddelenie klimatologickej služby, Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

PhDr. František Radi , PhD.

Ústav sociálnych disciplín, Vysoká škola zdravotníctva a sociálnej práce sv. Alžbety, Bratislava

E-mail: marekkucera556@gmail.com, david.scepka@gmail.com, jozef.pecho@shmu.sk, radifrantisek@gmail.com