



Scenáře zmeny klímy na území Slovenska (2030 – 2100)

Odbor Klimatologická služba, Bratislava
Jozef Pecho, Mgr., RNDr. Pavel Šťastný, CSc.,
Mgr. Katarína Mikulová, PhD.

Rok 2022 bol 5. – 6. najteplejší rok aspoň od 1880 (+1,2 °C v porovnaní s predindustriálnym obdobím).

Obdobie posledných piatich rokov, 2018 – 2020, skončilo s odchýlkou +1,1 až +1,25 °C.

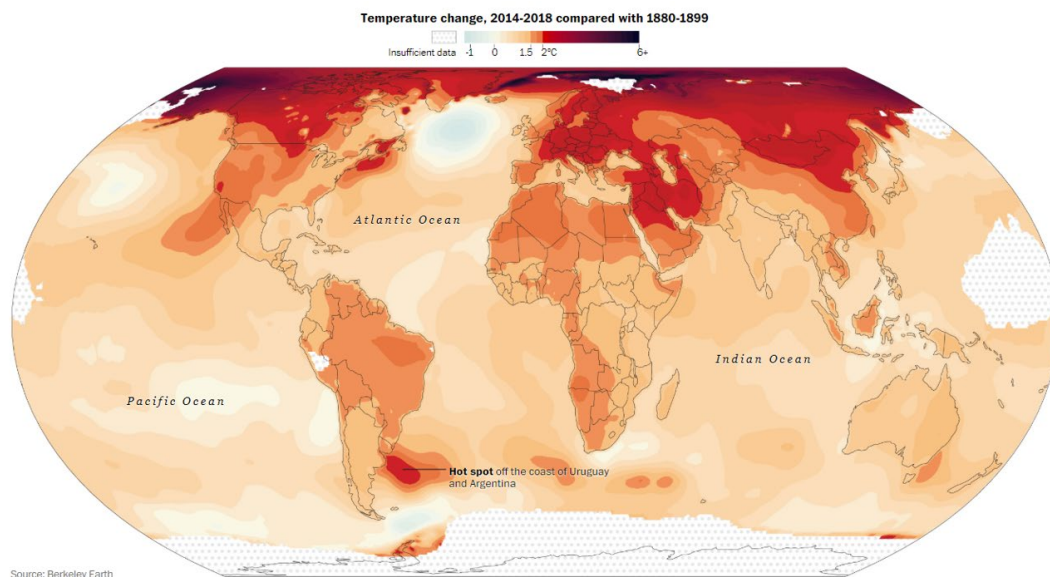
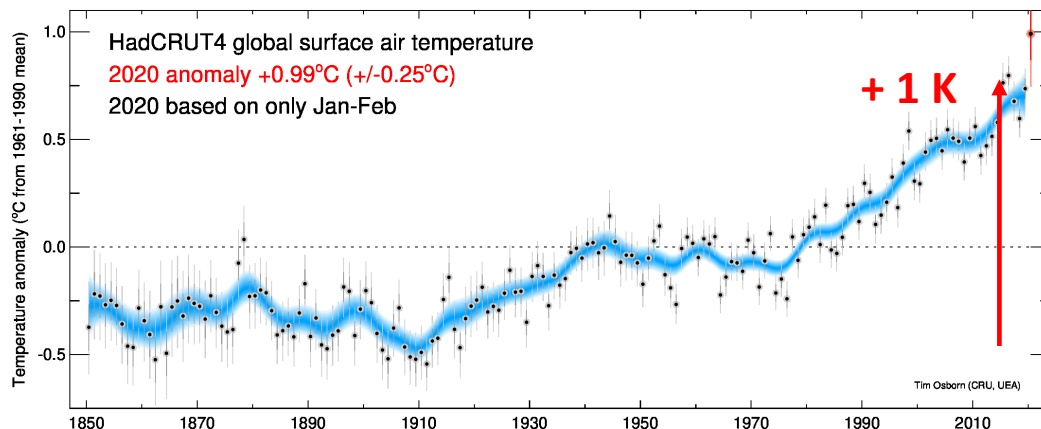
Podľa poslednej správy IPCC (AR6, 2021-22) sa priemerná globálna teplota v období od začiatku 20. storočia (1901-2013) zvýšila o **1,0 °C (K)**.

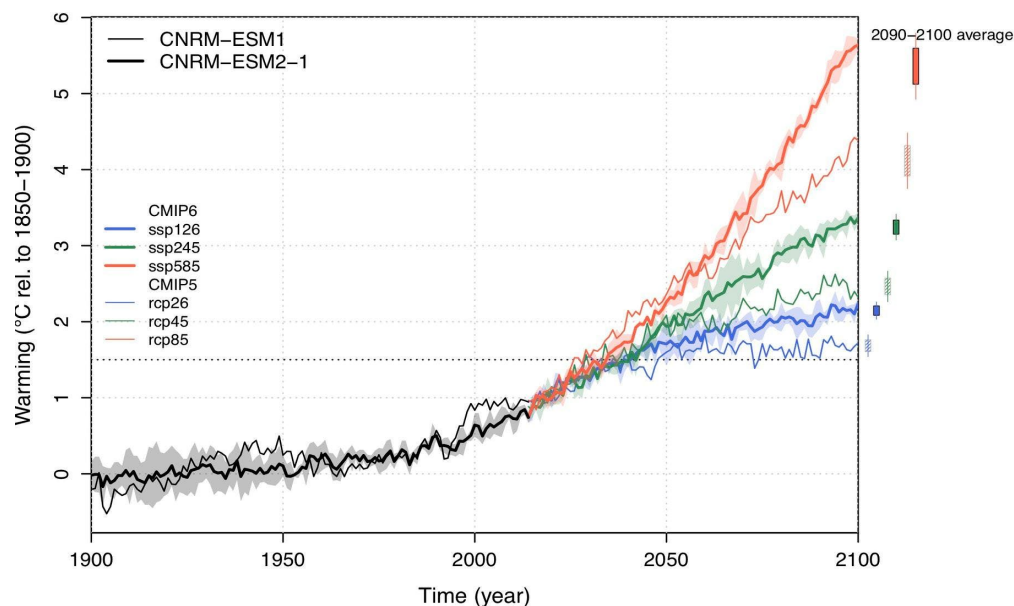
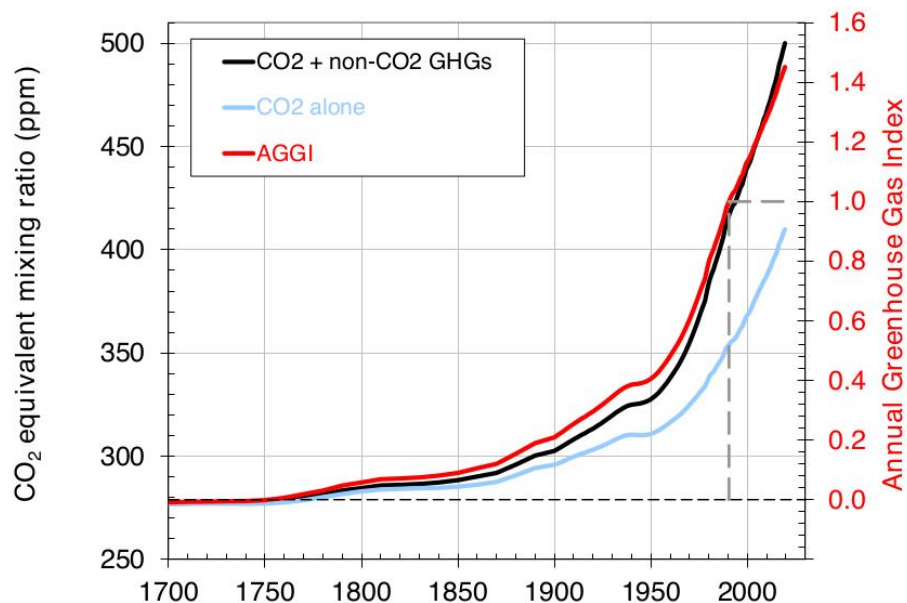
Rýchlu mieru oteplenia v priebehu posledných 70 rokov vykazujú aj všetky oceánske oblasti, a to až do hĺbky 2000 metrov.

Mnohé kontinentálne oblasti na severnej pologuli vykazujú oteplenie aj o viac ako **2,0 °C** (1880-2022).

Polárne oblasti na severnej pologuli (**Arktída** + Grónsko) sa od polovice 20. storočia otepľujú 2- až 3-násobne rýchlejším tempom ako zvyšok planéty.

Databázy globálnej teploty (NASA, NOAA, JMA, CRU, ECMWF-ERA) sú v odhade rastu teploty **časovo konzistentné**.





Zvyšujúca sa **globálna koncentrácia skleníkových plynov** je hlavnou príčinou klimateckej zmeny, pričom tento nárast je výsledkom nevyrovnanej bilancie medzi emisiami skleníkových plynov z ľudských (antropogénnych) zdrojov a ich pohlcovaním (záchytnom) biosférou a oceánmi.

Predbežné údaje za rok 2019 naznačujú, že koncentrácia CO₂ dosiahne alebo dokonca prekročí v tomto roku hodnotu **410 ppm**. Priemerná rýchlosť rastu globálnej koncentrácie CO₂ sa počas troch po sebe nasledujúcich desaťročíach (1985-1995, 1995-2005 a 2005-2015) zvýšila z 1,42 ppm/rok na 1,86 ppm/rok, ďalej až a na 2,06 ppm/rok, v poslednom uvádzanom období.

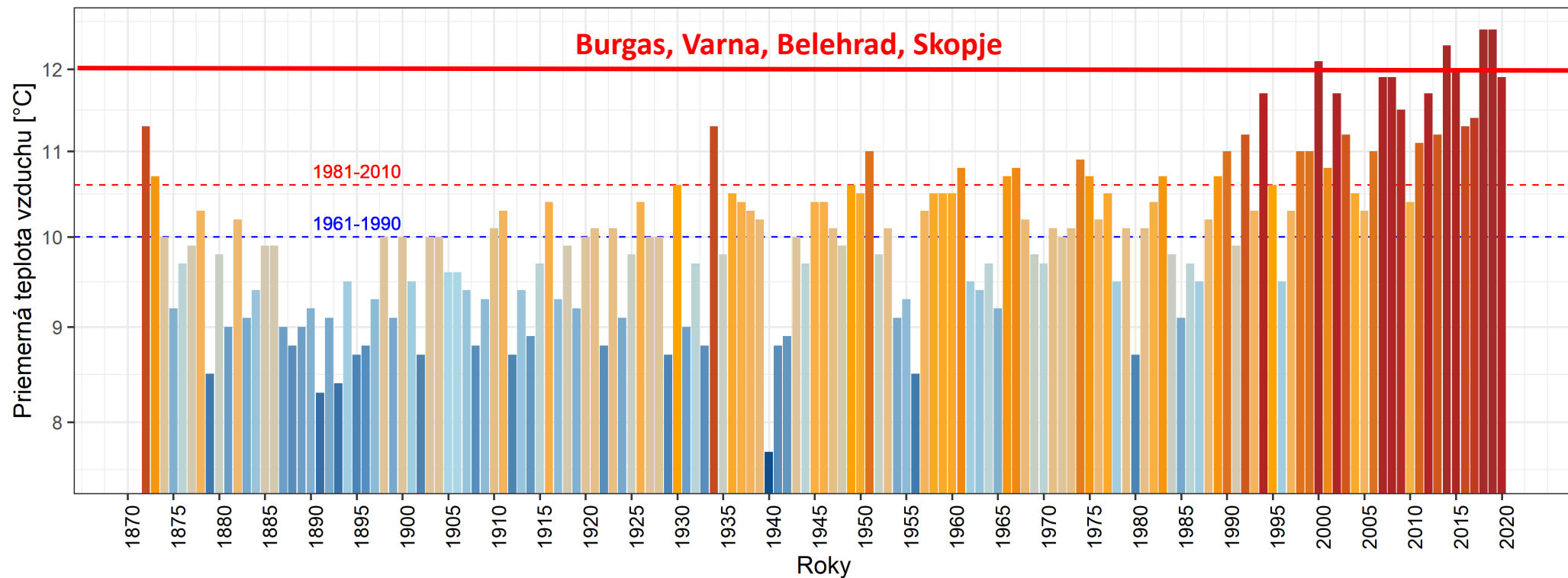
V prípade, že sa započíta radiačný účinok všetkých skleníkových plynov, celková koncentrácia v CO₂eq dosahuje v súčasnosti hodnotu **500 ppm** (AGGI index podľa [NOAA](https://www.noaa.gov/)).

Podľa emisných scenárov RCPs, môže koncentrácia CO₂ do konca tohto storočia dosiahnuť hodnoty od 420 ppm (RCP2.6) do 950 ppm (RCP8.5); pre **CO₂eq až 1250 ppm** (do roku 2100).

V pripravovanej 6. správe IPCC bude využitá nová generácia globálnych GCMs (CMIP6) kombinovaná s novou generáciou emisných scenárov **RCPs a SSPs** (klimatická citlivosť s lepšou parametrizáciou oblačnosti a silnejšej spätnej väzby zo strany uhlíkového cyklu bude pravdepodobne vyššia ako pri CMIP5 a CMIP3 modeloch; **~4-6 °C**).



Priemerná ročná teplota vzduchu (Hurbanovo)

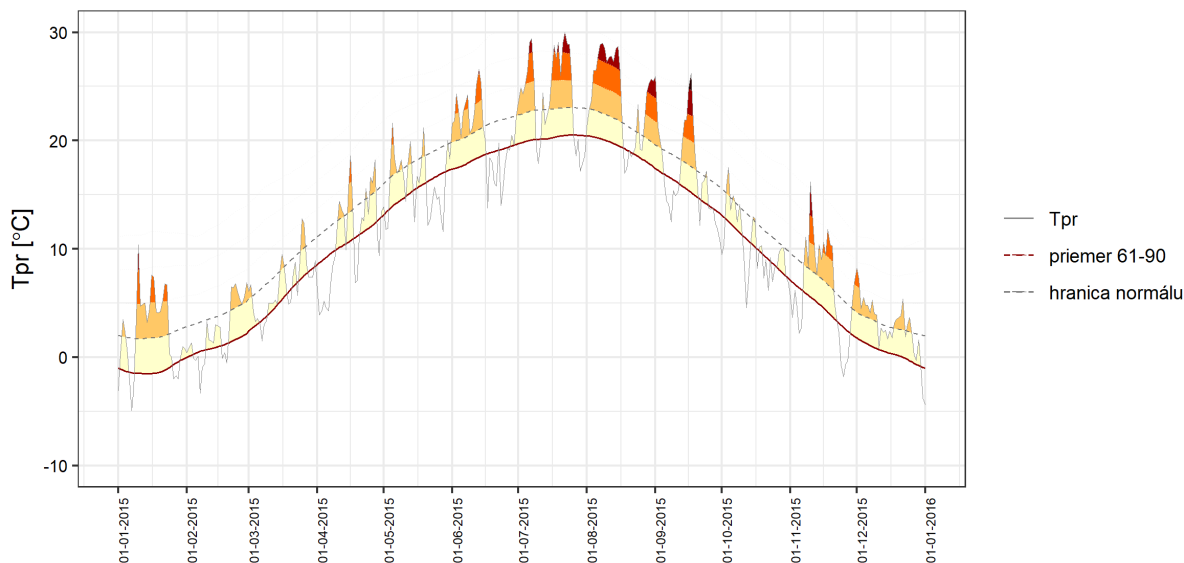


Od roku 1881 sa zvýšila priemerná ročná teplota vzduchu o 1,8 – 2,0 °C, pričom najrýchlejšie sa rast teploty prejavuje v letných mesiacoch, kedy priemerná teplota vzduchu vzrástla aj o viac 2,0 °C (v južných regiónoch Slovenska o takmer 3,0 °C).

Po roku 1991 výrazne pribudli teplotne nadnormálne roky (pozri graf vyššie), roky 2018 a 2019 boli extrémne teplé – priemerná ročná teplota vzduchu dosiahla v Hurbanove hodnotu **12,43 °C**, čo už sú klimatické podmienky takých miest ako Burgas, Varna, Belehrad či Skopje.



Odchýlka Tpr v Hurbanove v roku 2015 (v.p. s 1961-1990)



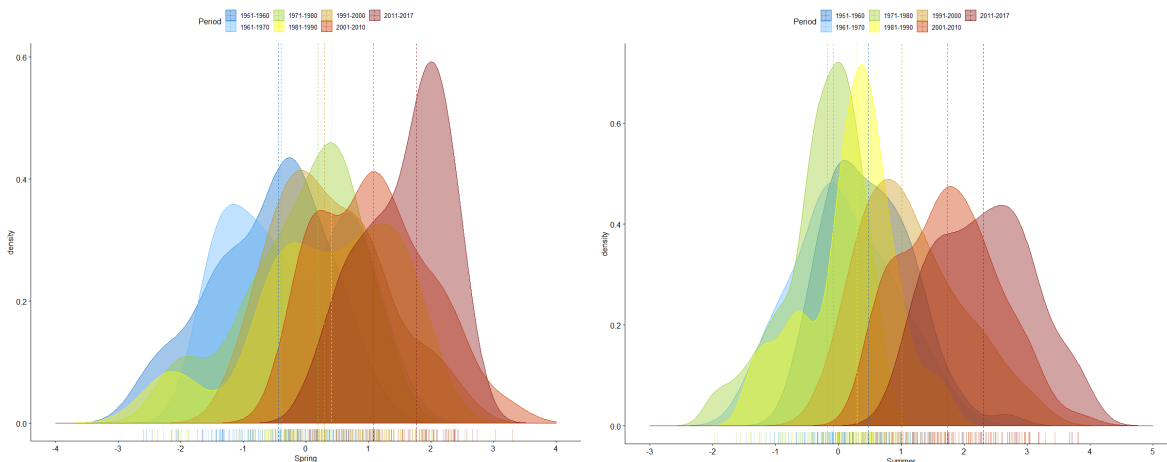
Od roku 1881 sa zvýšila priemerná ročná teplota vzduchu o **1,8 – 2,0 °C**, pričom najrýchlejšie sa rast teploty prejavuje v letných mesiacoch, kedy priemerná teplota vzduchu vzrástla aj o viac **2,0 °C**.

Od roku 1901 poklesli ročné úhrny zrážok v priemere na území Slovenska o **25 mm** (5,6 %; v južných regiónoch je tento pokles ešte výraznejší, viac ako 10 %).

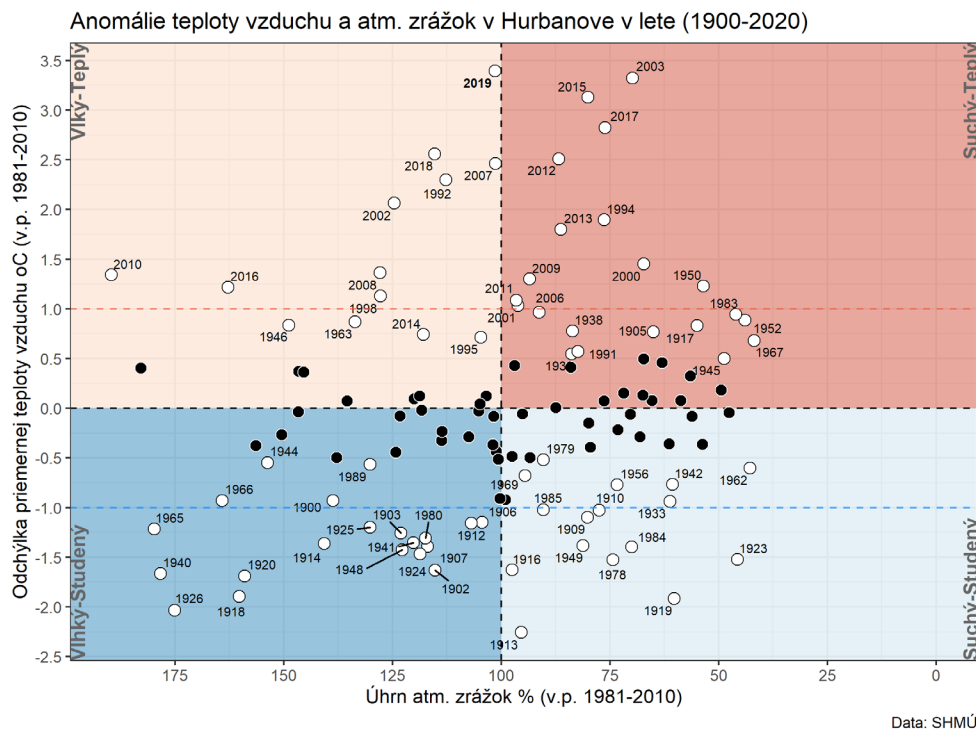
Desaťročie **1991 – 2000**, ale aj obdobie 2001 – 2010 sa charakteristikami teploty vzduchu, úhrnov zrážok, výparu, snehovej pokrývky, ako aj iných prvkov, priblížilo k predpokladaným podmienkam klímy okolo roku **2030**, ktoré boli vyčíslené v zmysle scenárov zmeny klímy pre naše územie, výnimkou sú iba nižšie úhrny zrážok v chladnom polroku a v zime v desaťročí 1991 – 2000.

Významne vzrástol počet „teplých“ extrémov Tmax, najmä po roku 1991 došlo k rýchlemu nárastu frekvencie vln horúčav na celom území Slovenska.

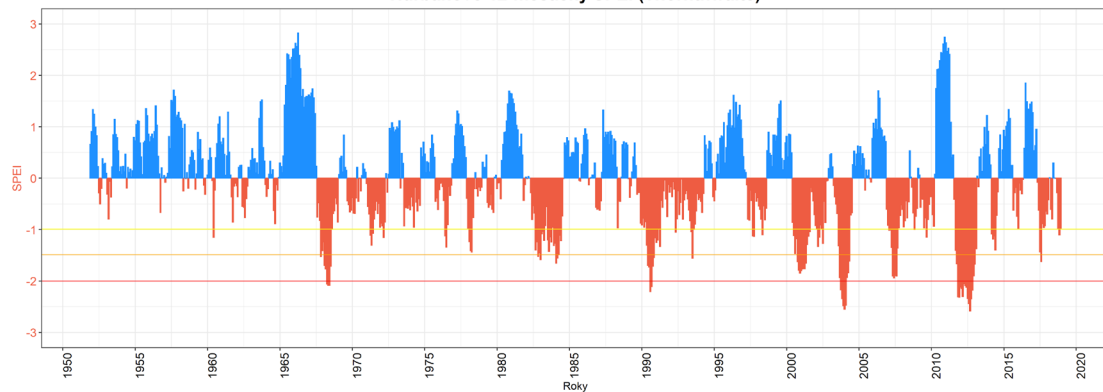
V období rokov 2001-2019 sa preukázateľne vyskytujú častejšie **suché periódy** (spôsobené najmä rastom potenciálnej evapotranspirácie).



Signál zmeny klímy na Slovensku (atmosférické zrážky & snehová pokrývka)



Hurbanovo 12-mesačný SPEI (Thorntwaite)



Rast sucha súvisí aj s **extremalizáciou niektorých zložiek hydrologického cyklu**. Prívalové krátkodobé zrážky sa ukazujú byť častejšie a intenzívnejšie (o približne 7-14 % na každý 1 °C oteplenia), zvyrazňujú sa aj extrémny denných a viacdenných úhrnov zrážok. V dôsledku vyššej teploty a vlhkosti vzduchu sa očakáva častejší výskyt silnejších a intenzívnejších konvekčných búrok.

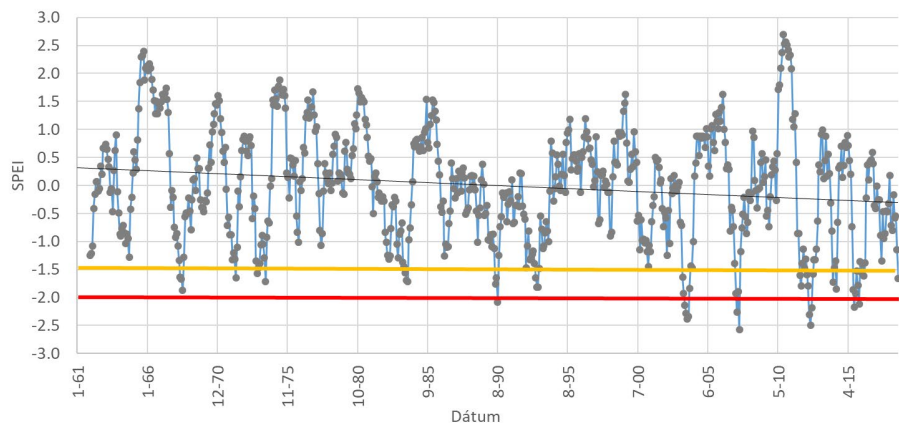
Významne sa zvyšujú predovšetkým intenzity **5 až 180 minútového dažďa**, čo je možné zdôvodniť častejším výskytom krátkodobých **konvekčných** zrážok a naopak zriedkavejším výskytom dlhotrvajúcich (a plošne rozsiahlejších) zväčša **stratiformných** zrážok.

Zmeny v teplotných a zrážkových pomeroch v zime sa prejavujú v zmenách snehových pomerov. Tie sú demonštrované jednak v znížení počtu dní so snehovou pokrývkou a tiež v **poklese priemernej výšky snehovej pokrývky**.

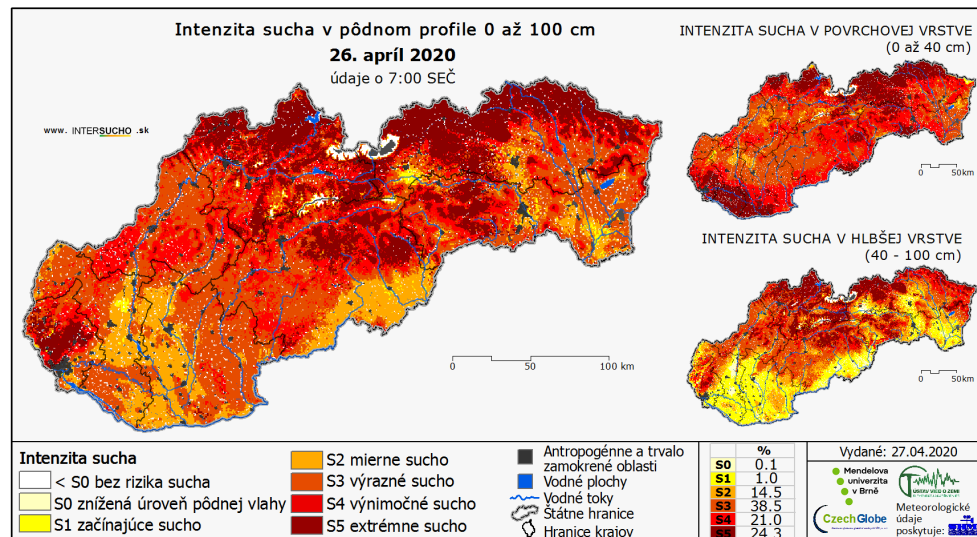
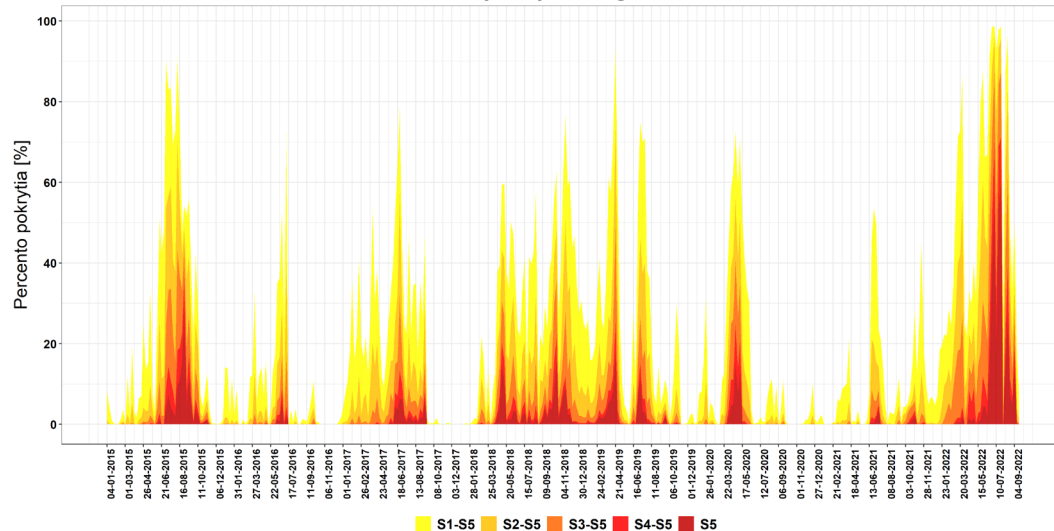
Výskyt extrémnejšieho počasia, častejšieho sucha a mimoriadne teplých sezón už dnes **významne ovplyvňuje všetky sektory národného hospodárstva** Slovenska (s nevyhnutnou častejšou sanáciou škôd, odškodňovaním poistných nárokov, etď.).

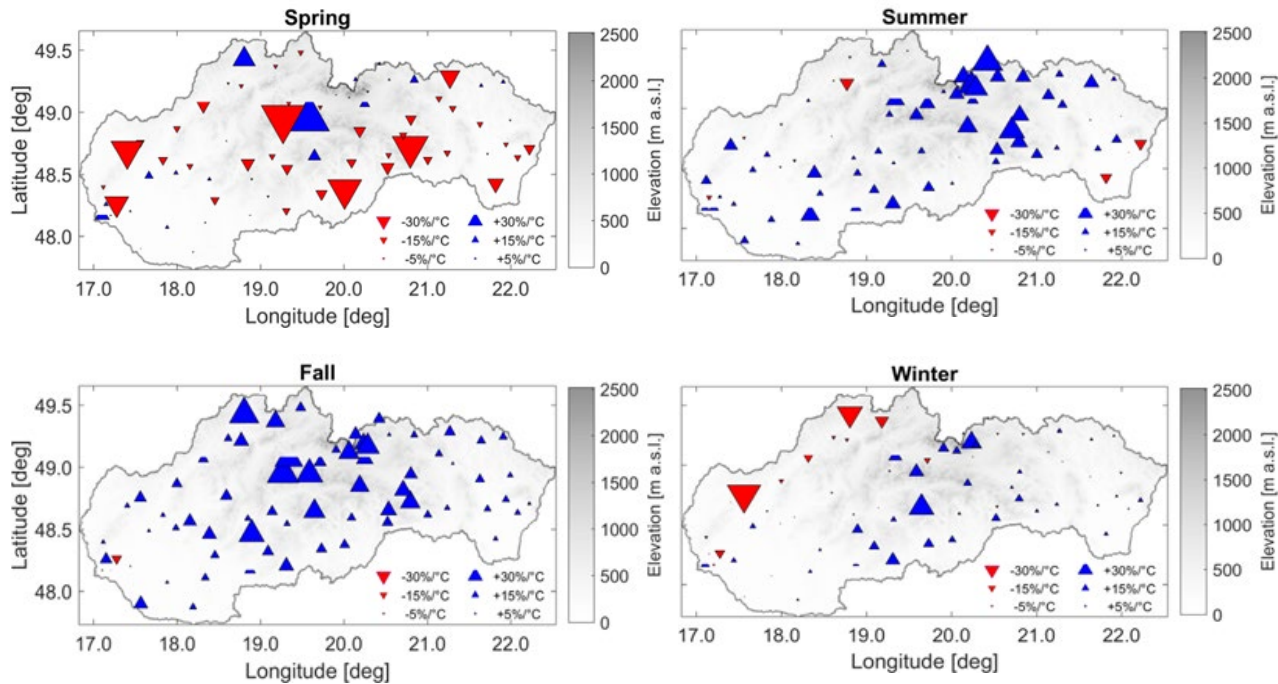


SPEI na území Slovenska od roku 1961

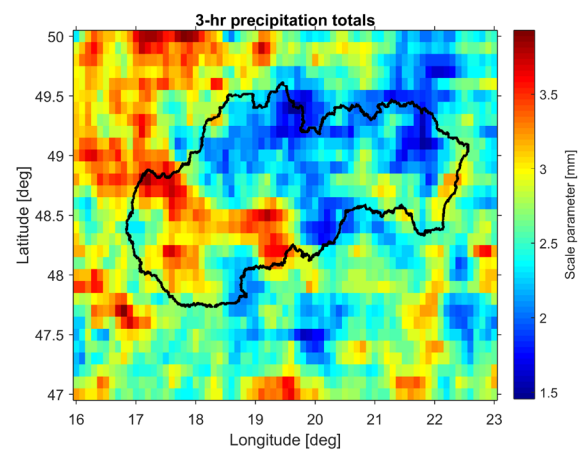
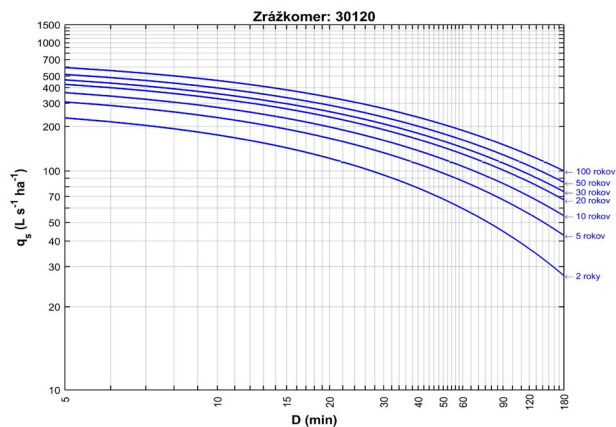
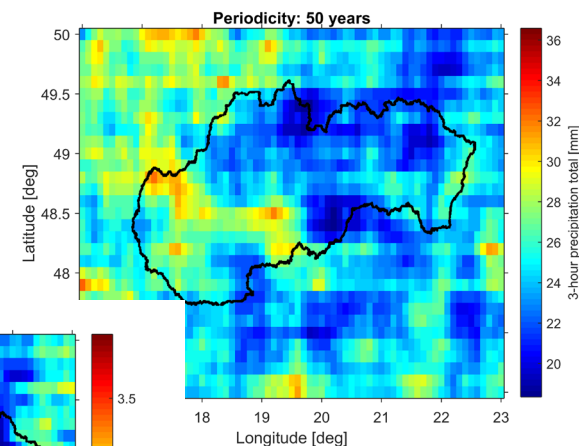


Percento zasiahnutého územia vybranými kategóriami sucha v období 2015 - 2022





3 hod max. RR
(100 a 50 T-yrs)



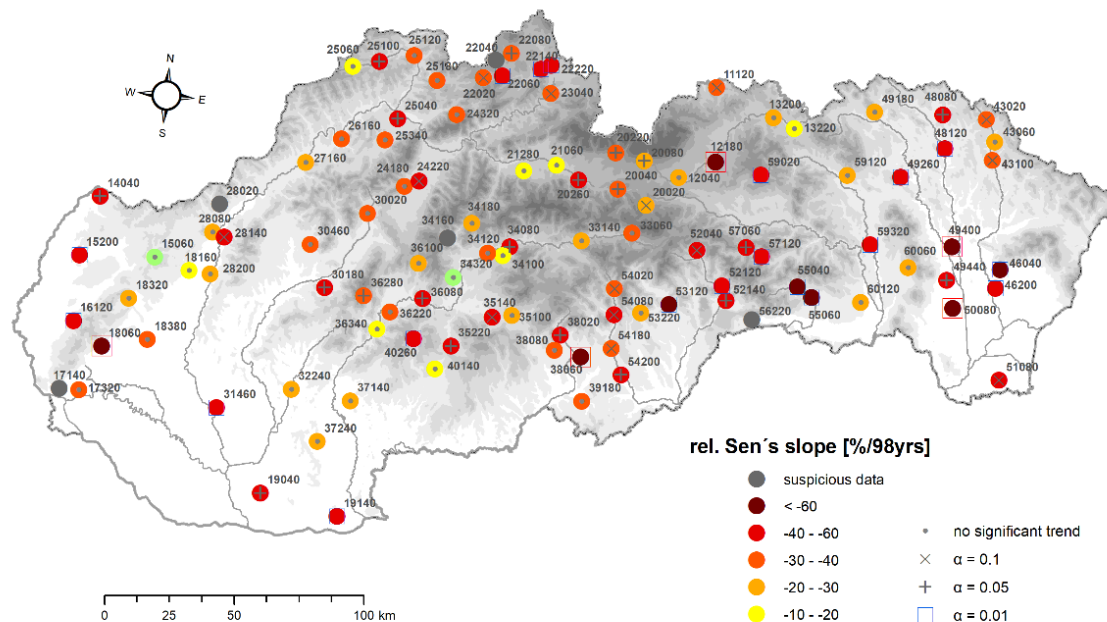
3 hod max. RR
(scale parameter)



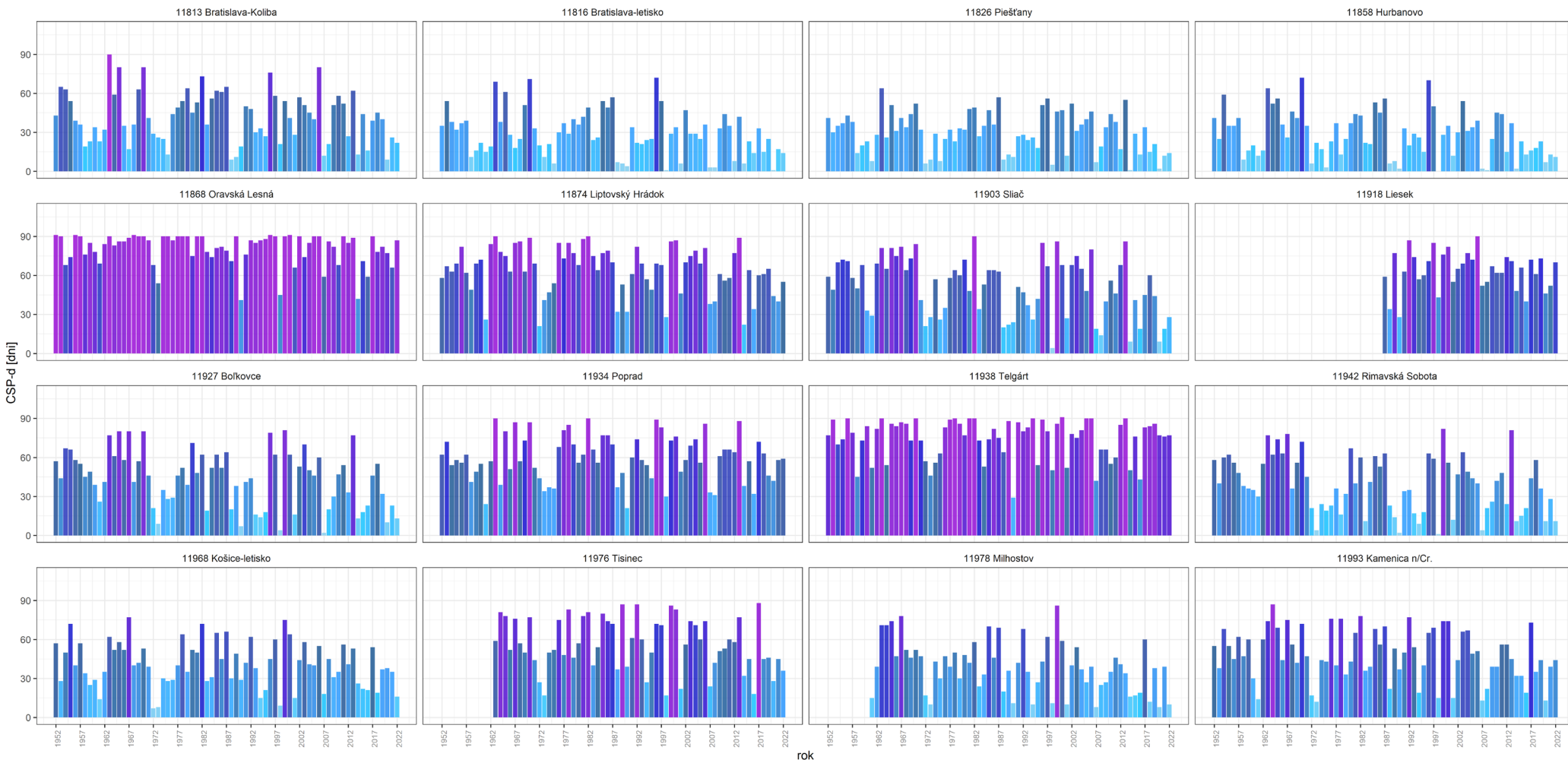
Decadal anomaly of snow cover sums [w.r.t. 1961-1990]



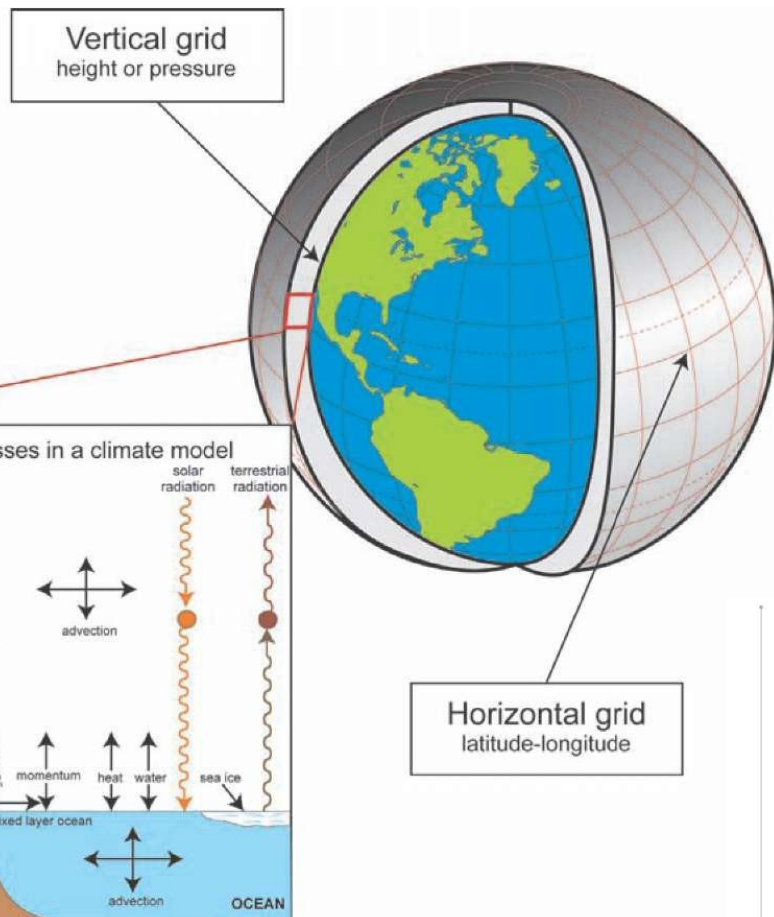
Relative total changes in snow cover sums [%/98yrs] in the 1921/22-2017/18 period



Počet dní s celkovou snehovou pokrývkou 1 cm viac za zimu v období 1951/52 - 2021/22 [dni]



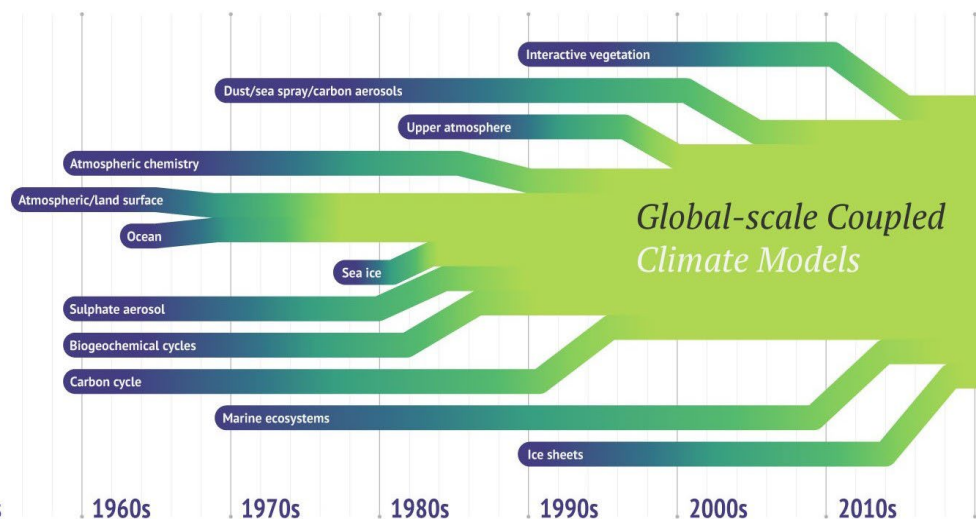
Modelovanie klímy s využitím numerických predpovedných modelov (NWPm)



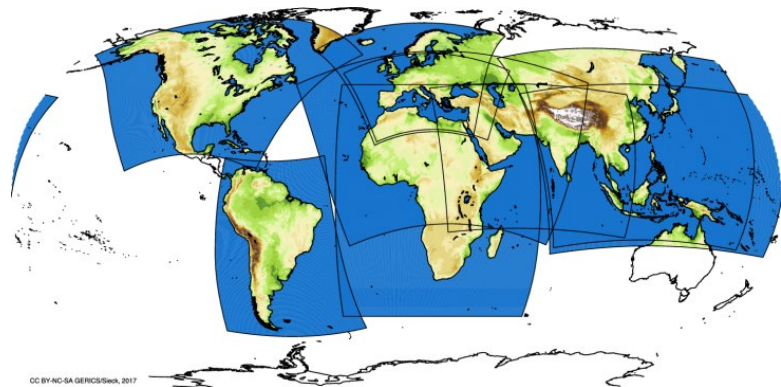
Klimatické modely predstavujú jednu z možností ako študovať stav globálneho alebo regionálneho klimatického systému, jeho priestorovú a časovú premenlivosť ako aj faktory, ktoré ovplyvňujú jeho dlhodobé zmeny.

Klimatické modely predstavujú numerickú reprezentáciu komplexného klimatického systému, ktorý pozostáva z veľkého množstva komponentov a zväčša nelineárnych väzieb a interakcií medzi jeho jednotlivými subsystémami (atmosféra, hydrosféra + oceány, kryosféra, biosféra a pedosféra) + fyzikálnych, chemických a biologických procesov.

Založené na **numerických predpovedných modeloch (NPM)**.



Príprava scenárov vybraných meteorologických prvkov (EURO-CORDEX)



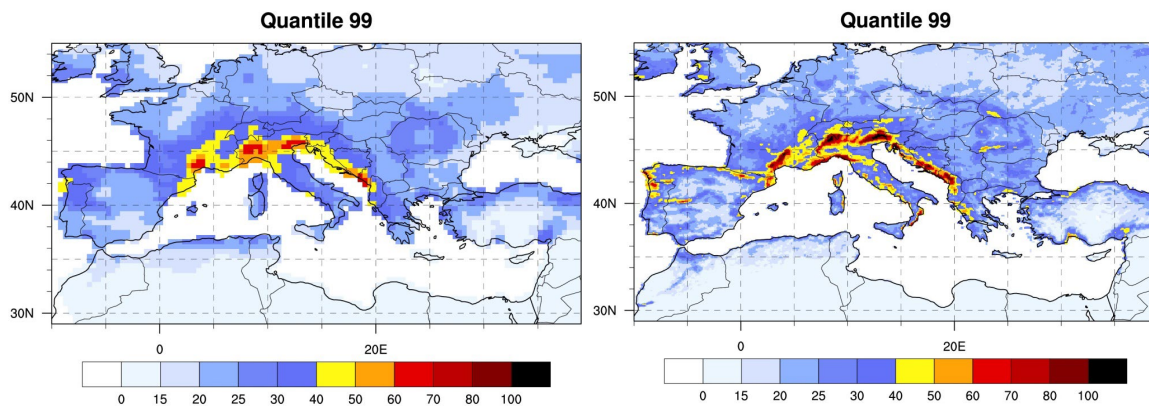
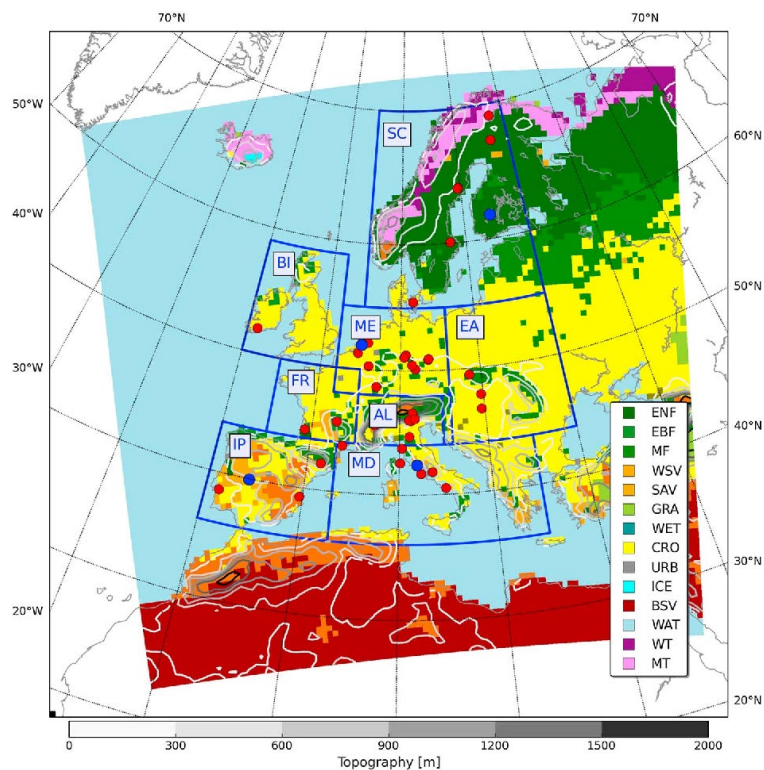
Projekt **CORDEX** (<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>) je momentálne najvýznamnejšou výskumnou iniciatívou v oblasti globálneho/regionálneho modelovania, časť projektu zaoberajúca sa oblasťou Európy sa nazýva **EURO-CORDEX** (www.euro-cordex.net) – čaká sa na update!

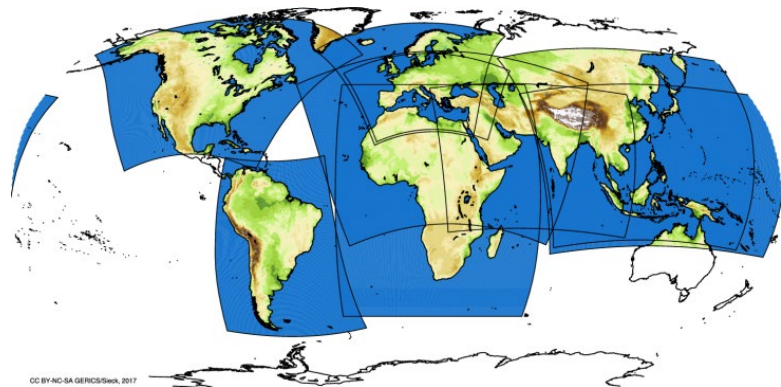
RCMs EURO-CORDEX sú riadené globálnou reanalýzou **ERA-Interim** (ERA5; RCPs -> SSPs emisné scenáre).

Pre prípravu scenárov IDF kriviek bolo využitých 15 RCMs EURO-CORDEX (3hrs RR) s rozlíšením 12×12 km, pre obdobie 2020 – 2100.

RR5-90 min boli vypočítané jednoduchým L-škálovaním pre 150 (550 staníc).

Využitie boli metódy bias-correction pre 3hrs RR (kvantilové mapovanie + gama distribúcia).





Projekt **CORDEX** (<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>) je momentálne najvýznamnejšou výskumnou iniciatívou v oblasti globálneho/regionálneho modelovania, časť projektu zaoberajúca sa oblasťou Európy sa nazýva **EURO-CORDEX** (www.euro-cordex.net) – čaká sa na update!

RCMs EURO-CORDEX sú riadené globálnou reanalýzou **ERA-Interim** (ERA5; RCPs -> SSPs emisné scenáre).

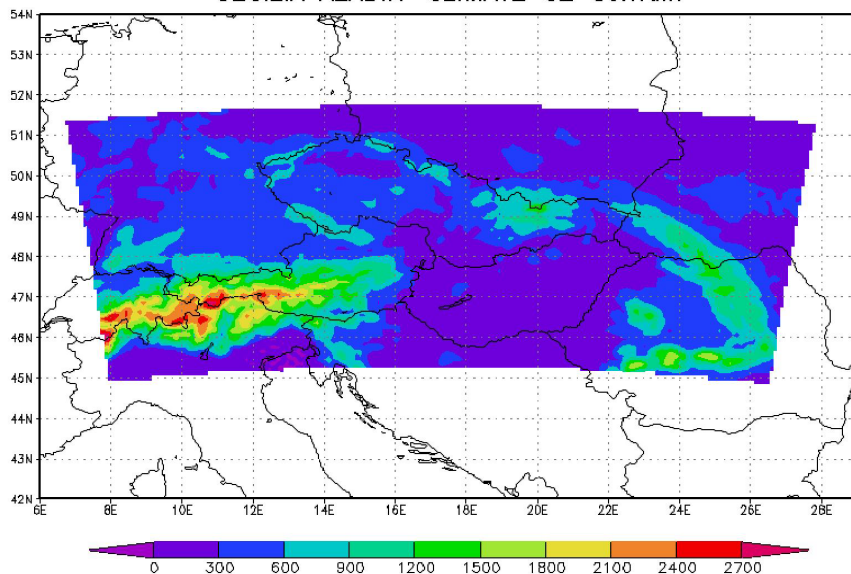
Pre prípravu scenárov IDF kriviek bolo využitých 15 RCMs EURO-CORDEX (3hrs RR) s rozlíšením 12 × 12 km, pre obdobie 2020 – 2100.

RR5-90 min boli vypočítané jednoduchým L-škálovaním pre 150 (550 staníc).

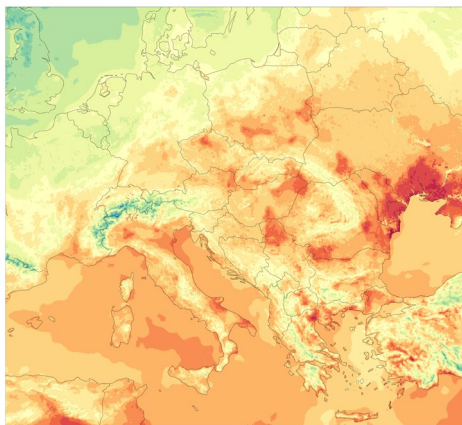
GCM	Akronym	RCM	ES	Obdobie	Premenná*	TS	Grid
CNRM-CERFACS-CM5 (Francúzsko)	CNRM	KNMI-RACMO22E (Holandsko)	RCP2.6	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP4.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP8.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
MPI-M-MPI-ESM-MR (Nemecko)	MPI	SMHI-RCA4 (Švédsko)	RCP2.6	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP4.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP8.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
NCC-NorESM1-M (Nórsko)	NORESM	GERICS-REMO2015 (Nemecko)	RCP2.6	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP4.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP8.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
ICHEC-EC-EARTH (Írsko)	ECEARTH	CLMcom-CLM-CCLM4-8-17 (EÚ)	RCP2.6	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP4.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP8.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
MOHC-HadGEM2-ES (UK)	MOHC	KNMI-RACMO22E (Holandsko)	RCP2.6	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP4.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km
			RCP8.5	2020-2050, 2051-2100	Tmax, Tmin, Precip., HR, WVP, WS, Srad	Denné	12×12 km



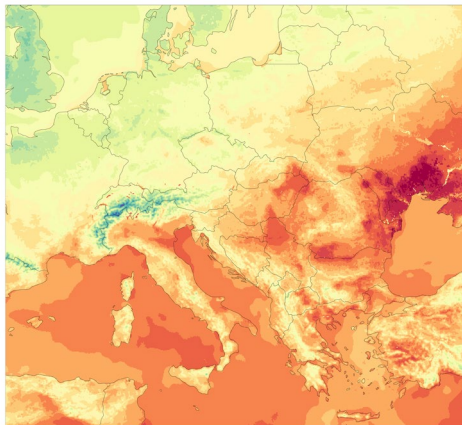
CECILIA ALADIN-CLIMATE CZ domain



SURFTemperature
2019/07/01 00:00 +7



SURFTemperature
2019/07/01 00:00 +30



Model **ALADIN** začal byť vyvíjaný začiatkom 90. rokov minulého storočia ako nástroj pre dynamickú adaptáciu (downscaling) globálneho predpovedného modelu ARPÉGE (prevádzkovaný v Météo-France).

SHMÚ využíva verziu **ALARO_01 (ALADIN)** -> operatívny spektrálny model S priestorovým rozlíšením 4,5 km.

VALIDAČNÁ VRSTVA -> dynamický downscaling reanalýzy ERA5 (LBC_LACE -> FPOS (integrácia today_00 -> +30 hrs).

PRÍPRAVA SCENÁROV (2100) -> GCM CNRM_CM6 (LBC_LACE -> ALARO_01 -> SSPs scenáre -> range 01 h pre RR).

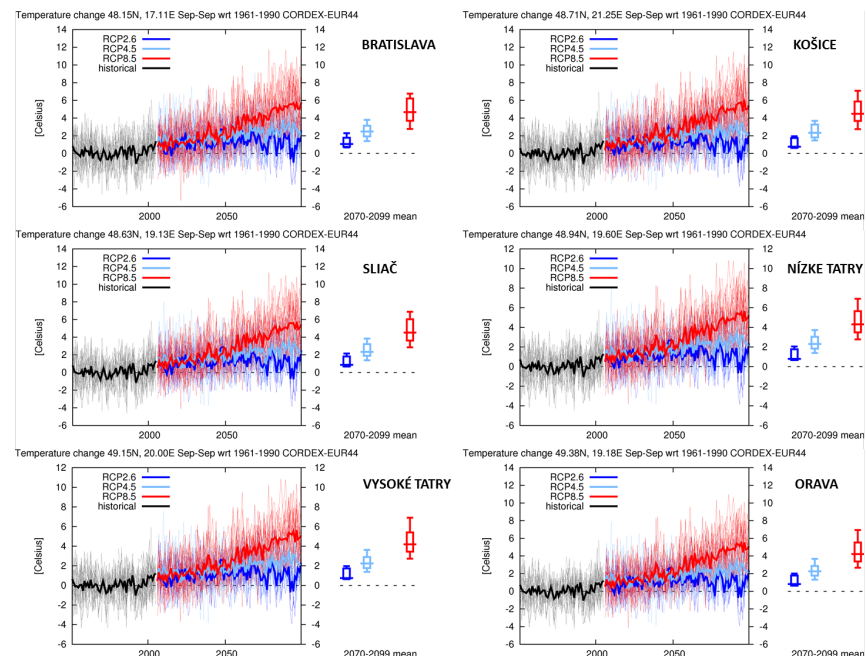
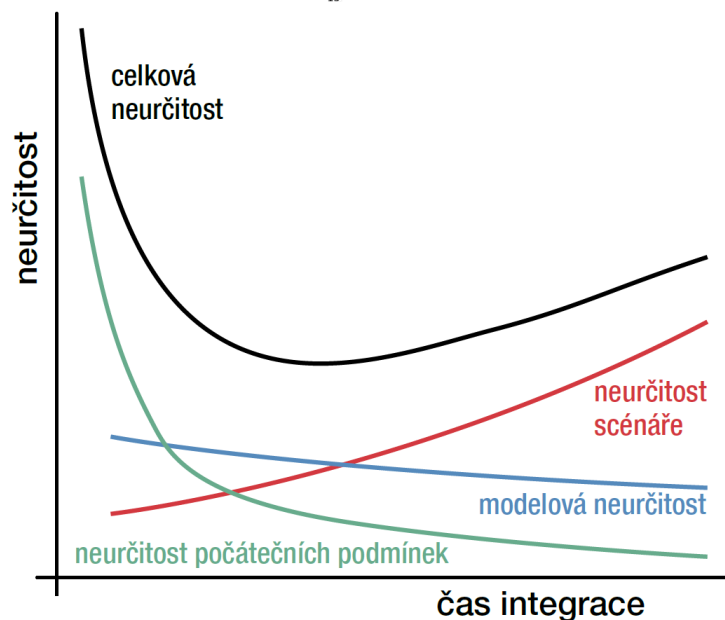
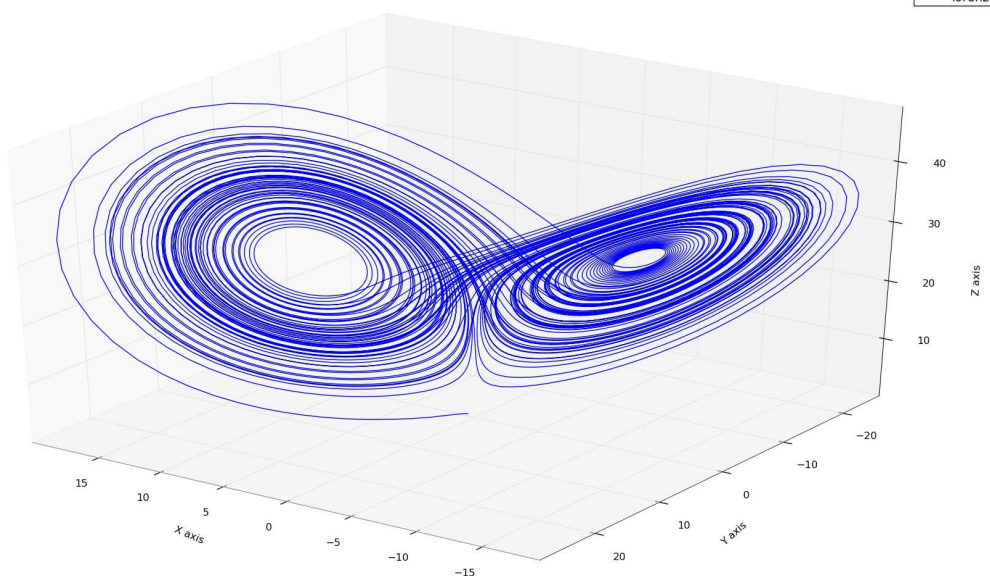
Riadiaci globálny klimatický model **ARPÉGE-CLIM** (CNRM) má v rámci Európy priestorové horizontálne rozlíšenie väčšinou okolo 50 x 50 km, na protiľahlej strane glóbusu potom 300 x 300 km.

RCM **ALADIN-CLIMATE/CZ** preukázal schopnosť simulovať klimatické charakteristiky v dostatočnej kvalite s rozlíšením 10-25 km, čo je v podmienkach strednej Európy obzvlášť dôležité.

ALARO_01 bude priestorovo dynamicky downscalovaný pomocou sub-modelu **SURFEX** (1 km).

Scenáre pre IDF budú počítané pre všetky časové oddiely/periodicity využitím RCMs EURO-CORDEX + ALADIN-CLIMATE/SR.



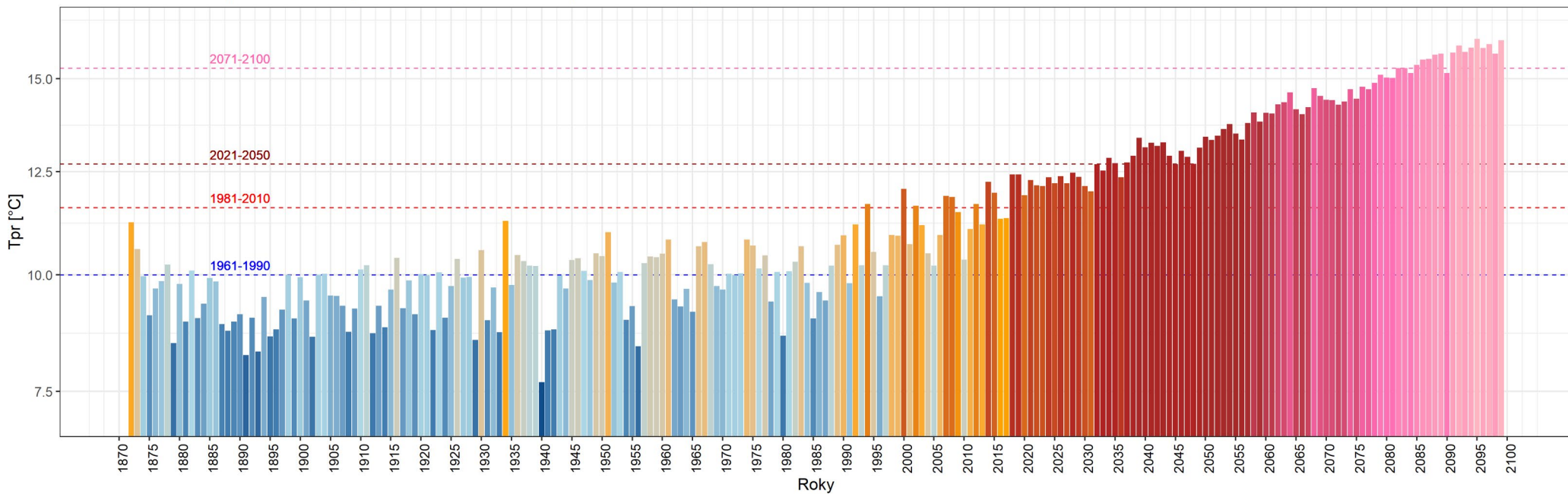


Zdroje neistôt

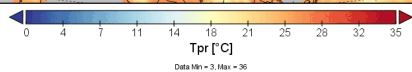
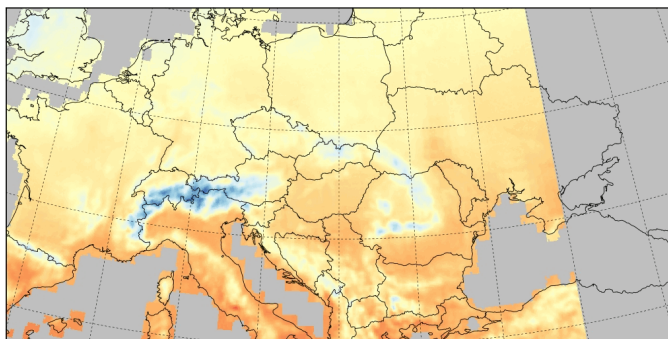
- Neistoty spojené s **problémami matematických formulácií jednotlivých fyzikálnych procesov v atmosfére a na zemskom povrchu** (modelová neurčitost').
- Neistoty spojené s **počiatocnými podmienkami** (kombinácia rôznych RCMs a GCMs, reanalýza).
- Neistoty spojené s **emisnými scenármi RCPs a SSPs**.
- Neistoty spojené s **dlhodobou premenlivosťou klímy** (klim. šum).



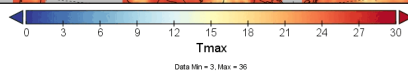
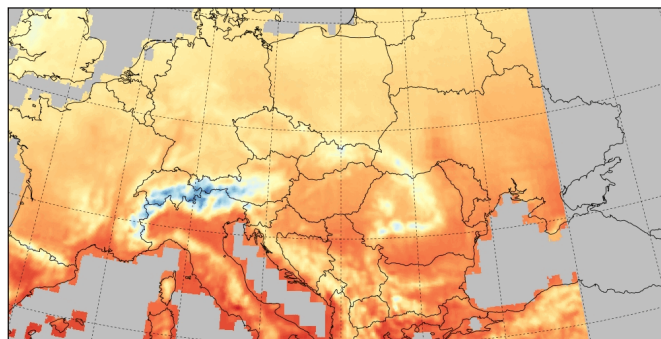
Priemerná ročná teplota vzduchu (Hurbanovo; 1872 - 2100 podľa RCP8.5)



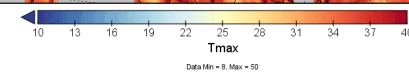
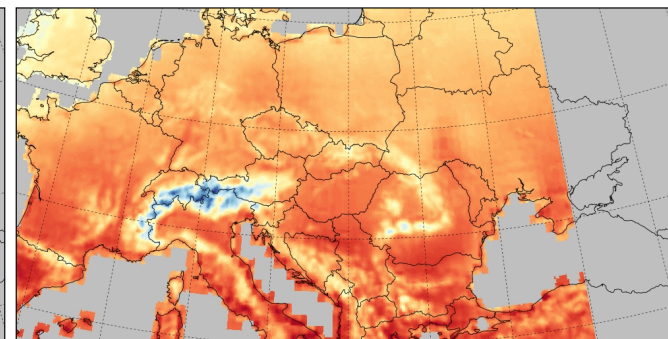
Tpr v lete (RCP8.5; ensemble mean)
Time: 2020-06-01



Tmax v lete (RCP4.5; ensemble mean)
Time: 2020-06-01



Tmax v lete (RCP8.5; ensemble mean)
Time: 2020-06-01

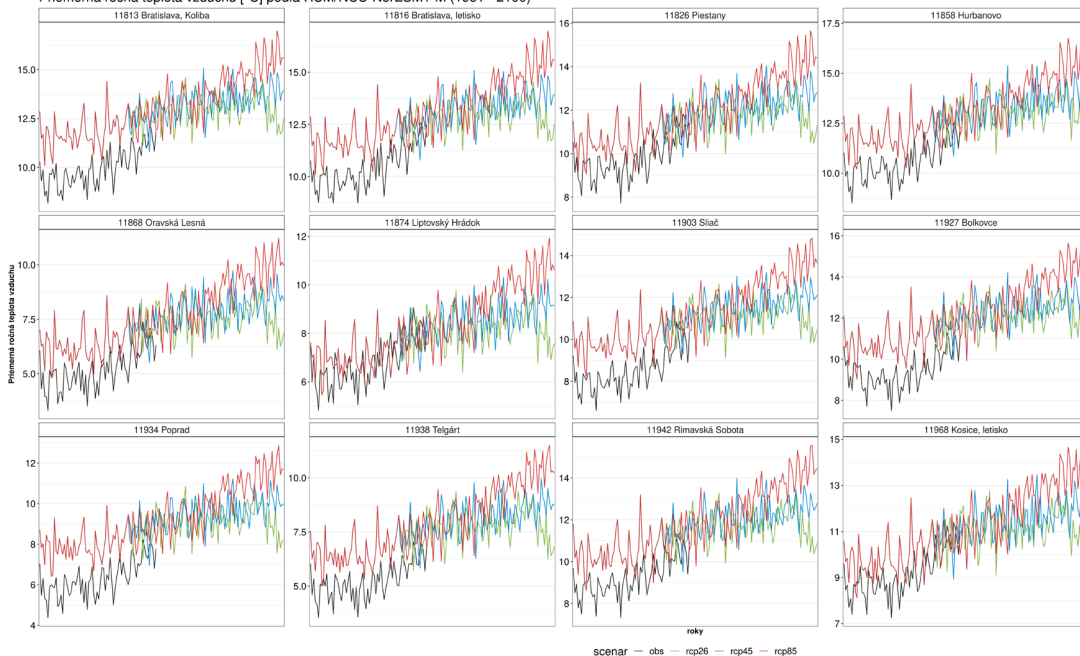




- Zistený [očakávaný] nárast priemernej ročnej teploty vzduchu o 3 až 5 °C do roku 2100 (2 – 3 °C do roku 2050) v závislosti od emisného scenára (RCPs); podľa nových SSP scenárov (nárast 5 – 8 °C do roku 2050)



Priemerná ročná teplota vzduchu [°C] podľa RCM/NCC-NorESM1-M (1951 - 2100)



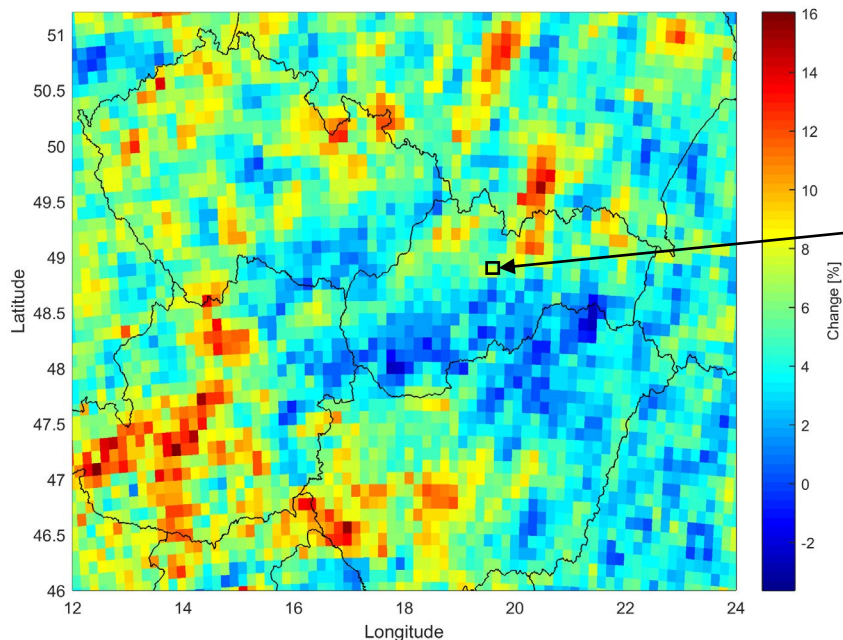
- Rýchlejšie by mali rásť denné minimá ako denné maximá teploty vzduchu (minimálna teplota vzduchu sa zvýši do roku 2100 v rozpätí od 6,0 do 10,0 °C, maximálna teplota vzduchu v rozpätí od 2,0 do 5,0 °C), čo môže spôsobiť pokles priemernej dennej amplitúdy teploty vzduchu.
- Scenáre nepredpokladajú výraznejšie zmeny v ročnom chode teploty vzduchu, v jesenných mesiacoch by ale mal byť rast teploty menší ako v zvyšnej časti roka (najrýchlejšie bude rásť priemerná teplota vzduchu **v lete a v zime, o 1,5 až 4,0 °C v lete, a o 2,5 až 5,0 °C v zime** do roku 2100).
- Už v horizonte do roku 2050 predpokladáme významný nárast počtu **letných dní, tropických dní, no poklesne počet mrazových dní a ľadových dní.**

- Najdôležitejší dôsledok z hľadiska teplotného komfortu je vzrast frekvencie, dĺžky a intenzity **vln horúčav**, ktoré môžu nastúpiť už v priebehu mája a nebudú zriedkavé ani do polovice septembra. V teplom polroku predpokladáme častejší výskyt vln horúčav, resp. periód s veľmi vysokými dennými teplotami vzduchu (nad 30, resp. 35 °C), vlny horúčav podobné tým z rokov 2003, 2007 alebo 2015 sa budú v období okolo roku 2050 vyskytovať **3- až 5-krát častejšie**.
- Predpokladá sa aj vyšší počet dní s **dusným počasím**, vzhľadom na celkový nárast parametrov obsahu vody v atmosfére. Očakáva sa rýchlejší nástup teplého a suchého počasia v jarnom období. V teplej časti roka sa očakáva zvýšenie premenlivosti úhrnov zrážok, zrejme sa predĺžia a častejšie vyskytnú málo zrážkové (suché) obdobia na strane jednej a zrážkovo výdatnejšie krátke daždivé obdobia na strane druhej.

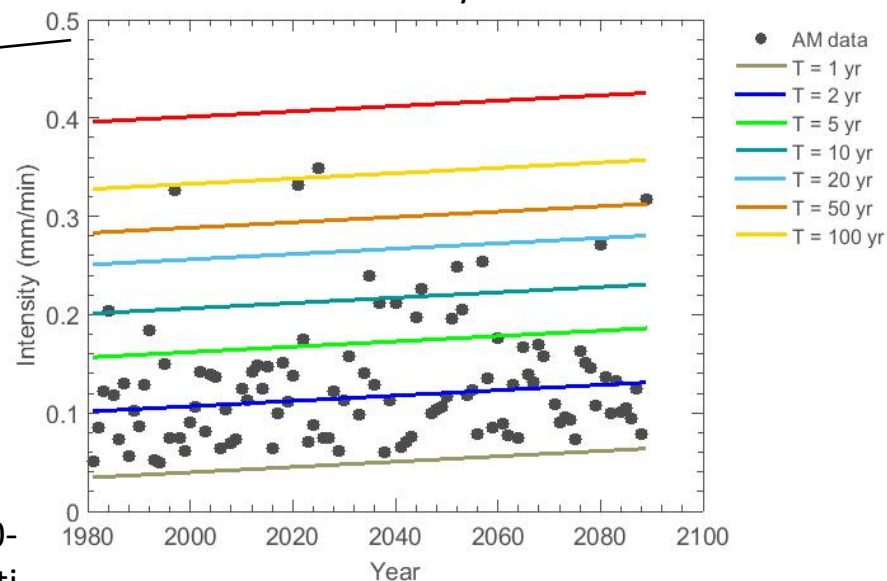


- **Zrážkové úhrny** na prevažnej časti územia Slovenska by mali podľa väčšiny RCMs simulácií rásť až do konca storočia.
- V oblasti južného a juhozápadného Slovenska sa budú zrážky zvyšovať do konca storočia v priemere do 10 % pre RCP4.5 a do 15 % podľa RCP8.5 v porovnaní s referenčným obdobím 1981-2010.
- Zatiaľ čo, zimné a jesenné úhrny zrážok postupne pomaly porastú, jarne a letné úhrny zrážok budú klesať, čo bude mať v kombinácii s vyššími teplotami vzduchu nepriaznivý vplyv na bilanciu zrážok a **častejší výskyt sucha**, a to predovšetkým v južnej polovici územia Slovenska.
- Prívalové a **intenzívne krátkodobé zrážky** budú pravdepodobne častejšie a intenzívnejšie – prevažná časť emisných scenárov v rámci použitého ansámbľu modelov potvrdzuje všeobecný nárast intenzít, a to najviac (aj keď s väčšou neistotou) pri kratších oddieloch dažďa. Nárast úhrnov ako aj intenzít predstavuje pre RCP2.6 pre obdobie 2021 – 2050 približne +5 až +8 %, pre obdobie 2051 – 2100 +3 až +5 %, pre RCP4.5 ide o nárast o +5 až +8 %, resp. o +10 až +14 %, pre RCP6.0 ide o nárast o +10 až +20 %, resp. +15 až +30 % a pre RCP8.5 o nárast o nárast +18 až 25 %, resp. +25 až +35 %.
- V dôsledku vyššej teploty a vlhkosti vzduchu sa očakáva častejší výskyt **silnejších a intenzívnejších búrok**. Výskyt extrémnych sprievodných fenoménov búrok, ako napr. nárazy vetra >25 m/s alebo krúpy s priemerom 2-5 cm, bude významne častejší; pri vysokých nárazoch vetra (>25 m/s) môže byť výskyt o 20 až 80 % vyšší, pri krúpach s priemerom do 50 cm o 40 až 150 % vyšší do roku 2100 (podľa zvoleného emisného scenára).
- Zmeny v teplotných a zrážkových pomeroch v zime sa prejavujú na zmenách **snehových pomerov**. Tie sa predpokladajú jednak v znížení počtu dní so snehovou pokrývkou a tiež v poklese priemernej výšky snehovej pokrývky. V súvislosti s rastom extrémnosti zrážok treba však počítať v zimnom období s častejším výskytom vyšších denných prírastkov nového snehu.





Nestacionárna frekvenčná analýza naznačuje nárast kvantilov intenzít atm. zrážok v čase. Napr. 20-ročný dážď na začiatku storočia sa podľa modelu do konca 21. storočia zmení na 10-ročný dážď.



Percentuálna zmena 180-min zrážok s dobou opakovania $T = 20$ -rokov (periodicita $p = 0,05$) v horizonte 2080 oproti referenčnému obdobiu 1990-2020.

GCM: HadGEM2DMI, RCM: HIRHAM5, RCP: 8.5 W/m²
 (“business as usual”)

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

