

HOLTANOVÁ, E., HALENKA, T., 2023. Hodnocení nejistoty připravovaných scénářů změny klimatu. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha, ČHMÚ, 34-39, ISBN 978-80-7653-063-8.

<https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.04>

---

## Hodnocení nejistoty připravovaných scénářů změny klimatu (Assessment of uncertainty of the PERUN climate change scenarios)

Eva Holtanová, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,  
[eva.holtanova@matfyz.cuni.cz](mailto:eva.holtanova@matfyz.cuni.cz)

Tomáš Halenka, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,  
[tomas.halenka@matfyz.cuni.cz](mailto:tomas.halenka@matfyz.cuni.cz)

**Abstrakt:** Základním zdrojem dat o možném vývoji klimatu v České republice je v rámci projektu PERUN série simulací modelu ALADIN-CLIMATE/CZ řízená globálním klimatickým modelem CNRM-ESM2-1. Pro odhady nejistot, kterými je každý scénář změny klimatu zatížen, slouží další dostupné modelové simulace, zejména soubory běhů CMIP5 a CMIP6 globálních klimatických modelů, Euro-CORDEX regionálních klimatických modelů, a dalších nových simulací ve vysokém horizontálním rozlišení. Příspěvek představí výsledky analýzy nejistot z těchto datových zdrojů, konkrétně bude pozornost věnována porovnání řídicího modelu CNRM-ESM2-1 s ostatními globálními modely.

**Klíčová slova:** antropogenní vlivy na klima – socio-ekonomický scénář – scénář změny klimatu

**Abstract:** The main source of data about possible future climate change over the Czech Republic studied within the project PERUN is a series of ALADIN-CLIMATE/CZ model simulations driven by the global climate model CNRM-ESM2-1. Other available model simulations, in particular the CMIP5 and CMIP6 global climate models, Euro-CORDEX regional climate models, and other new simulations at high horizontal resolution, will be used to estimate the uncertainties in the climate change scenarios. This paper presents examples of such uncertainty analysis.

**Keywords:** anthropogenic climatic forcings – socio-economic pathway – climate change scenario

### 1. Úvod

Základním zdrojem dat o možném vývoji klimatu v České republice je v rámci projektu PERUN série simulací modelu ALADIN-CLIMATE/CZ řízená globálním klimatickým modelem CNRM-ESM2-1. Nejistota spojená s neznámým vývojem emisí skleníkových plynů, změn ve využívání povrchu a dalších lidských aktivit, které mohou potenciálně ovlivnit podnebí, je zohledněna díky použitím několika scénářů, resp. tzv. SSPs (shared socio-economic pathways). Tyto SSPs zahrnují celou řadu procesů, v dalším textu budeme pro zjednodušení používat termín „emisní scénář“. Více informací o SSPs lze nalézt např. v Meinshausen et al. (2020). V předchozí generaci modelových simulací byly využívány „representative concentration pathways“ (RCPs, Moss et al., 2010). Číselné označení daného scénáře indikuje velikost změny (nárůstu) radiačního působení očekávané na konci 21. století oproti polovině 19. století.

Jelikož jsou ale výstupy klimatických modelů (pro daný emisní scénář) nevyhnutelně zatíženy celou řadou nejistot (Abramowitz et al. 2019; Holtanová a Kalvová 2015), je nutné navržený

scénář doprovodit odhadem rozsahu neurčitosti. Zdroje nejistot lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Prvním je vnitřní variabilita klimatu a druhým je samotná formulace modelu, kam patří celé spektrum metod, rozlišení modelu, parametrizace apod. U použití regionálního klimatického modelu sem pak spadá i interakce mezi řídicím a vnořeným modelem, a vnořený model samotný.

Vliv vnitřní variability na projekce budoucího klimatu lze do jisté míry zohlednit použitím tzv. „perturb initial conditions ensembles“, tedy souborů simulací jednoho modelu s modifikovanými počátečními podmínkami. Nejistotu spojenou se strukturou samotného modelu odhadujeme pomocí ansámbly simulací různých modelů. Ani jeden „typ“ nejistoty nejsme schopni postihnout v celé šíři, takže předpokládáme, že výsledný odhad nejistoty skutečnou neurčitost spíše podhodnocuje (Abramowitz et al. 2019).

V souvislosti s nejnovější generací globálních klimatických modelů CMIP6 (Eyring et al. 2016) je kromě zmíněných dvou skupin zdrojů nejistot diskutována i nejistota ve velikosti citlivosti klimatu, tzn. výraznosti reakce klimatického systému na určité vnější působení. Ukazuje se, že některé modely z nové generace mají výrazně větší tuto citlivost než jejich předchůdci. „Citlivější“ modely pak dávají vyšší hodnoty změn teploty pro daný emisní scénář (v globálním, ale často i v regionálním měřítku, viz např. Hausfather et al. 2022). Existují různé postupy, jak se s touto nejistotou vypořádat. Jedním z nich je výběr pouze určité skupiny modelů, s vyřazením těch, které mají nejvyšší citlivost, anebo určité „vážení“ modelů, např. na základě jejich schopnosti simulovat klimatické charakteristiky v nedávné minulosti.

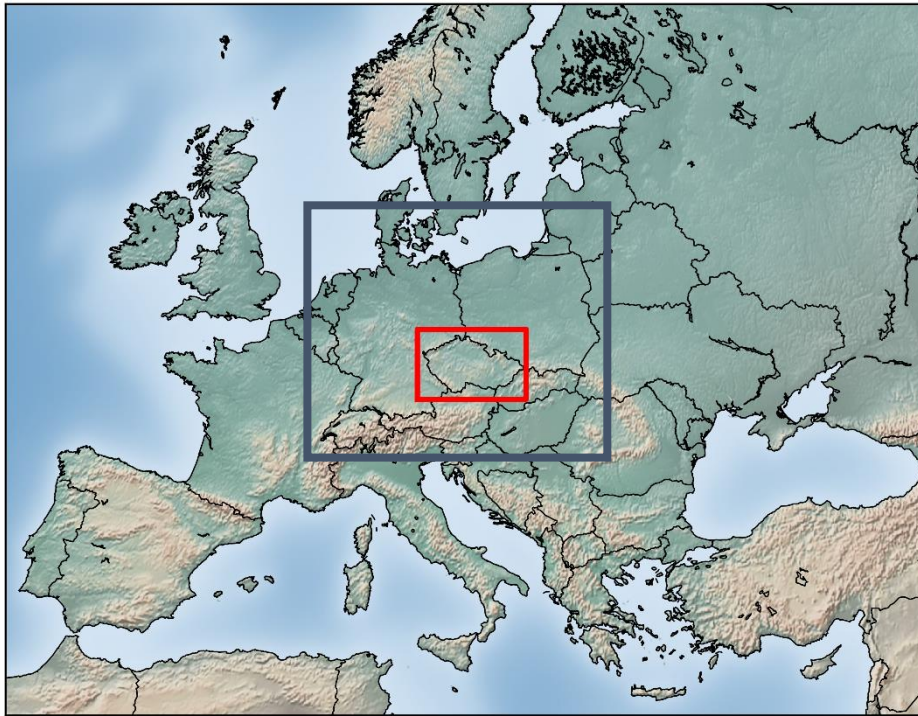
V tomto příspěvku představíme dvě ukázky hodnocení nejistoty. Změny průměrného ročního chodu teploty vzduchu a srážek simulované „naším“ řídicím modelem CNRM-ESM2-1 budou porovnány s rozsahem změn podle dvou souborů globálních klimatických modelů (generace CMIP5 a CMIP6). Zde bude ukázán i rozsah nejistoty daný vnitřní variabilitou modelu. Změny v průměrných četnostech vybraných extrémních charakteristik dané opět CNRM-ESM2-1 budou porovnány se souborem simulací CMIP6, a bude ukázán možný postup pro zohlednění úspěšnosti modelů ve vystižení klimatu v posledních desetiletích.

Zde představené výsledky byly převzaty z našich publikací Holtanová et al. (2022) a Dhib et al. (2023).

## 2. Data

Byly použity výstupy CMIP5 (Taylor et al. 2012) a CMIP6 (Eyring et al. 2016) globálních klimatických modelů. Zvláštní pozornost je věnována modelu CNRM-ESM2-1 z generace CMIP6, který je použit jako řídicí model pro simulaci modelu ALADIN-CLIMATE/CZ v projektu PERUN. Představené analýzy byly provedeny pro oblast střední Evropy s Českou republikou ve středu studované oblasti (viz obr. 1), modelové výstupy v jednotlivých uzlových bodech byly zprůměrovány přes vybranou oblast. Data byla zpracována prostřednictvím uživatelské platformy Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ).

Pozornost je věnována změnám simulovaných hodnot pro období 2070–2099 v porovnání s referenčním obdobím 1961–1990. V části 3.1 bylo použito 47 CMIP5 modelů a 57 CMIP6 modelů. Pro model CNRM-ESM2-1 byly použity ještě další členy ansámbly s perturbovanými počátečními podmínkami, konkrétně pro scénář SSP2-4.5 deset členů, pro scénář SSP5-8.5 jen pět členů (více nebylo k dispozici). V části 3.2 bylo použito 48 CMIP6 globálních modelů pro čtyři různé emisní scénáře SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 a SSP5-8.5.



Obr. 1 Geografické oblasti, pro které byly provedeny analýzy v části 3.1 (červený obdélník) a 3.2 (modrý obdélník).

Fig. 1 Areas of analysis in section 3.1 (red rectangle) and 3.2 (blue rectangle).

### 3. Ukázky hodnocení nejistoty

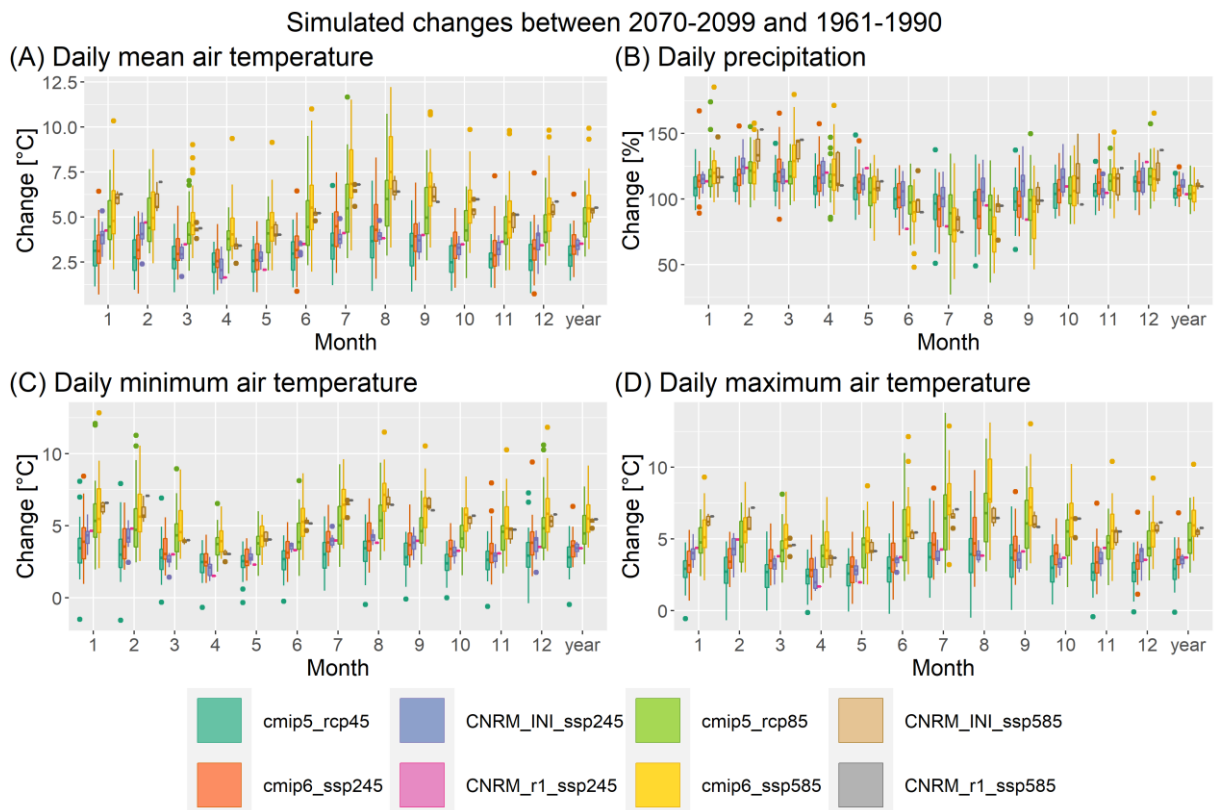
Odhad nejistoty je proveden na základě rozsahu studovaného ansámblu simulací. Tento rozsah může být zhodnocen na základě některé charakteristiky rozptýlenosti, např. směrodatné odchylky. V tomto příspěvku ilustrujeme rozsah souboru simulací pomocí zobrazení tzv. boxplotů, tj. krabicových grafů, kde horizontální úsečka uvnitř „boxu“ ukazuje polohu mediánu daného souboru, hranice „boxu“ odpovídají dolnímu a hornímu kvartilu, vertikální úsečky udávají rozsah 1,5násobku mezikvartilového rozpětí, a případné body ukazují polohy odlehlých hodnot.

#### 3.1 Změny ročního chodu teploty vzduchu a srážek

V této části je ilustrováno hodnocení rozsahu nejistoty simulovaných změn průměrných měsíčních teplot vzduchu (průměrné, minimální a maximální denní teploty vzduchu) a srážek v období 2070–2099 oproti období 1961–1990 (obr. 2). Porovnány jsou dva emisní scénáře, mírnější scénář počítá s nárůstem radiačního forcingu o  $4,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (RCP4.5, SSP2-4.5), méně optimistický scénář s nárůstem  $8,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (RCP8.5, SSP5-8.5). Teplotní změny jsou ve všech měsících kladné, s nejvyšším očekávaným nárůstem teploty v letních měsících, nejnižší změny jsou simulovány v zimě a na jaře (obr. 2). GCM z generace CMIP6 dávají většinou vyšší změny teploty než CMIP5, rozdíl mezi generacemi je větší v létě a na podzim. Roční průměrné teplotní změny simulované modelem CNRM-CM2-1 (řídící simulace pro regionální simulaci v projektu PERUN) jsou blízko mediánu celého multi-modelového souboru. V zimě je tato simulace mezi modely, které dávají vyšší teplotní změny, v létě spíše naopak.

Pokud se týká změn srážek, tak průměrné roční změny jsou u většiny modelů mírně kladné (medián modelů v obou zkoumaných souborech odpovídá nárůstu ročních srážek o 5 %). V zimní části roku se většina modelů shoduje na mírném nárůstu srážek, v létě se ale modely zcela neshodují na znaménku změny. U CMIP5 modelů je medián celého souboru blízko nule, některé modely dávají mírný nárůst srážek, jiné pokles. CMIP6 modely dávají spíše pokles

letních srážek, výraznější u scénáře SSP5-8.5. Simulace CNRM-ESM2-1 předpokládá pokles srážek o 10 až 25 % v letní polovině roku, a nárůst srážek v podobném rozsahu v dalších měsících, přičemž rozdíly mezi jednotlivými scénáři jsou jen nepatrné.



Obr. 2 Simulované změny měsíčních průměrů průměrné denní teploty vzduchu (A), denního úhrnu srážek (B), minimální denní teploty vzduchu (C) a denních maximálních teplot vzduchu (D) pro období 2070–2099 v porovnání s obdobím 1961–1990, průměr pro oblast České republiky. "Year" označuje průměrnou roční změnu. Boxploty znázorňují medián, dolní a horní kvartily, vertikální úsečky udávají rozsah 1,5násobku mezikvartilového rozpětí, a případné body ukazují polohy odlehlých hodnot. Výsledky jsou ukázány pro GCM generace CMIP5 podle RCP4.5 a RCP8.5, CMIP6 podle SSP2-4.5 a SSP5-8.5 a mini-ansámbli modelu CNRM-ESM2-1 s perturbovanými počátečními podmínkami. (Převzato z Holtanová et al. 2022)

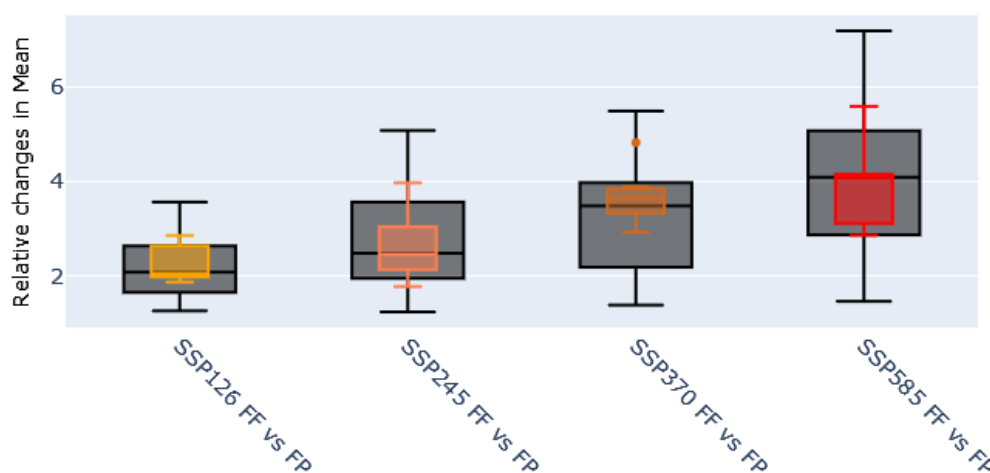
Fig. 2 Projected changes of monthly means of daily mean air temperature (A), daily precipitation amount (B), daily minimum air temperature (C) and daily maximum air temperature (D) for the period of 2070–2099 in comparison to 1961–1990 averaged over the area of the Czech Republic, "year" denotes annual mean change. Boxplots show intra-ensemble statistical distribution (median, lower and upper quartiles, whiskers representing 1.5 \*IQR, and outliers as dots) of CMIP5 under RCP4.5 (dark green), CMIP6 under SSP2-4.5 (orange), perturbed initial conditions mini-ensemble of CNRM-ESM2-1 GCM under SSP2-4.5 (10 members, blue), CMIP5 under RCP8.5 (light green), CMIP6 under SSP5-8.5 (yellow), perturbed initial conditions mini-ensemble of CNRM-ESM2-1 GCM under SSP5-8.5 (5 members, brown). The CNRM-ESM2-1 r1i1p1f2 simulation is plotted as a pink line for SSP2-4.5 and as grey line for SSP5-8.5. (published in Holtanová et al. 2022)

### 3.2 Změny v četnostech extrémních situací

V této části ilustrujeme zhodnocení rozsahu nejistoty změn počtu letních dní, tj. dní s maximální denní teplotou vzduchu nad 25 °C, na základě souboru simulací CMIP6 globálních modelů. Obr. 3 ukazuje boxploty změn simulovaných pro čtyři různé emisní scénáře. Šedé boxploty ukazují rozsah celého dostupného souboru simulací, barevné boxploty odpovídají výběru deseti modelů, které byly zhodnoceny jako nejúspěšnější v simulaci vybraných

charakteristik klimatu v referenčním období 1961–1990 (více informací o výběru modelu lze nalézt v Dhib et al. 2023).

Jak je vidět na obr. 3, simulované relativní změny se pohybují v rozsahu 1,5 až 7, tzn. všechny modely pro všechny emisní scénáře počítají s nárůstem počtu letních dnů na území střední Evropy na konci 21. století. Velikost změny narůstá s vyšším radiačním forcingem (tedy je nejnižší pro SSP1-2.6 a nejvyšší pro SSP5-8.5). Omezením výběru modelů na „nejlepší výběr“ (syté barevné boxploty na obr. 3) bylo dosaženo snížení rozsahu souboru. Snížení hodnoty mediánu očekávaných změn bylo dosaženo pouze u scénáře SSP5-8.5, u ostatních scénářů tedy není takovýto výběr modelů řešením výše diskutovaného „citlivějších“ modelů. Některý jiný postup výběru anebo vážení modelů by ale pravděpodobně očekávaný výsledek mohl přinést, hodnocení modelů totiž vždy závisí na výběru kritérií a metrik (např. Holtanová et al. 2012).



Obr. 3 Relativní změny počtu letních dnů (dnů s maximální denní teplotou vzduchu nad 25 °C) simulované souborem CMIP6 globálních modelů podle čtyř SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-3.7, SSP5-8.5) pro období 2070–2099 (FF, „far future“) ve srovnání s referenčním obdobím 1961–1990 (FP, „far past“). Boxploty znázorňující rozložení celého souboru více modelů jsou šedé. Boxploty znázorňující rozložení nejlepších vybraných modelů jsou barevné.

Fig. 3 Relative changes in the number of summer days (days with maximum daily air temperature above 25 °C) as simulated by a suite of CMIP6 GCMs under four socio-economic pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-3.7, SSP5-8.5) for the period of 2070–2099 (FF, far future) in comparison the reference period of 1961–1990 (FP, far past). The boxplots showing the distribution of the whole multi-model ensemble are grey. The boxplots showing the distribution of the best selected models are colored.

#### 4. Závěr

Vyhodnocování nejistot je úzce spjato s hodnocením úspěšnosti modelů v simulaci pozorovaných klimatických charakteristik. Řada studií již potvrdila, že je prakticky nemožné vybrat jeden model, který by vykazoval nejlepší shodu s pozorováním ve všech hodnocených ohledech. Právě proto jsou využívány multi-modelové soubory (ansámby) simulací.

Jak zde bylo ilustrováno, pro účely vytváření scénářů změny klimatu existují postupy, jak se alespoň částečně vyrovnat s neurčitostmi výstupů klimatických modelů. Nicméně je stále třeba základního výzkumu s cílem lépe porozumět tomu, co klimatické modely dokážou, a kde jsou naopak jejich slabiny. Zjemňování prostorového rozlišení, v poslední době až do módu „convection-permitting“ simulací, je zcela jistě správným krokem. Je ale nutno zdůraznit, že se tím automaticky nezlepšují všechny rysy simulovaného klimatu, vždy je nutno při aplikaci

modelových výstupů v následných studiích postupovat obezřetně a zohlednit známé zdroje nejistot.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

## Literatura

ABRAMOWITZ, G., HERGER, N., GUTMANN, E., HAMMERLING, D., KNUTTI, R., LEDUC, M., et al., 2019. ESD reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: Weighting, sub-selection and out-of-sample testing. *Earth Syst. Dyn.*, **10**(1), 91–105.

<https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019>

DHIB, S., HOLTANOVÁ, E., VERMA, S., HALENKA, T., 2023. Projections of Climatic Extremes over Central Europe with performance based constraints. *Weather and Climate Extremes*, in preparation.

EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., et al., 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model. Dev.*, **9**(5), 1937–1958.

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

HAUSFATHER, Z., et al., 2022. Climate simulations: recognize the ‘hot model’ problem. *Nature*, 605.7908:26–29.

HOLTANOVÁ, E., BELDA, M., HALENKA, T., 2022. Projected changes in mean annual cycle of temperature and precipitation over the czech Republic: Comparison of CMIP5 and CMIP6. *Frontiers in Earth Sciences*, **10**, 1018661. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1018661>

Holtanová, E., Halenka, T., 2023: Scénáře změny klimatu. In: Tolasz, R. (Ed.), Sborník příspěvků z První Konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). ČHMÚ, Praha, s. 28–34, ISBN 978-80-7653-063-8. <https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.04>

HOLTANOVÁ, E., KALVOVÁ, J., 2015. Neurčitosti výstupů regionálních klimatických modelů. *Meteorologické zprávy*, **68**, 4, 116–123.

HOLTANOVÁ, E., MIKŠOVSKÝ, J., KALVOVÁ, J., PIŠOFT, P., MOTL, M., 2012. Performance of ENSEMBLES regional climate models over Central Europe using various metrics. *Theoretical and Applied Climatology*, **108**, 463–470. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0542-5>

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., et al., 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model. Dev.*, **13**(8), 3571–3605.

<https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>

MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., van VUUREN, D. P., et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>