

CHARLES UNIVERSITY IN PRAGUE, FACULTY OF SCIENCE

Department of Physical Geography and Geoecology



**LONG-TERM VARIABILITY OF HEAT WAVES
AND COLD SPELLS IN CENTRAL EUROPE**

**DLOUHODOBÁ PROMĚNLIVOST HORKÝCH A
STUDENÝCH VLN VE STŘEDNÍ EVROPĚ**

Summary of the doctoral dissertation / Autoreferát disertační práce

Mgr. Ondřej Lhotka

Title: Long-term variability of heat waves and cold spells in Central Europe

Author: Mgr. Ondřej Lhotka

Department: Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University in Prague

Supervisor: RNDr. Jan Kysely, Ph.D., Institute of Atmospheric Physics, Czech Academy of Sciences

Abstract: Heat waves and cold spells have serious impacts on natural environment and society. The main aims of this thesis are to examine past variability of Central European heat waves and cold spells, to assess severity of recent events in a long-term context, to evaluate simulation of heat waves in climate models, and to construct their scenarios for a possible future climate. Heat waves and cold spells were primarily investigated as spatial events, using gridded data sets. E-OBS gridded data was utilized to assess past variability of heat waves and cold spells and to evaluate regional climate model (RCM) simulations from the ENSEMBLES and EURO-CORDEX projects. An extremity index that captures joint effects of temperature, duration, and spatial extent of individual heat waves and cold spells was proposed and tested. The persistent 1994 heat wave was found to be the most extreme over Central Europe in the 1950–2012 period, and the summer of 2013 was unprecedented at several Central European stations according to seasonal heat wave characteristics. The severity of cold spells was largest in the winters of 1955/1956 and 1962/1963, and the winter of 2011/2012 was ranked as the 6th most severe since the mid-20th century according to seasonal sums of the extremity index. Reproduction of heat waves in Central Europe was examined in an ensemble of RCMs driven by the ERA-40 reanalysis. The multi-model mean reflected the characteristics of heat waves quite well, but considerable differences were found among the individual RCMs and deficiencies were identified also in reproducing interannual and interdecadal variability of heat waves. Magnitude of the 1994 heat wave was underestimated in all RCMs and this bias was linked to overestimation of precipitation during and before the heat wave. Projections of heat waves for a possible future climate were studied using RCM simulations driven by global climate models forced by three different concentration scenarios. In the near future (2020–2049), heat waves are projected to be twice as frequent compared to the historical period and a similar increase was found under all concentration pathways. By contrast, the projected frequency of heat waves in the late 21st century (2070–2099) depends largely upon concentration scenarios. Three to four heat waves per summer are projected in this period (compared to less than one in the recent climate) and severe heat waves are likely to become a regular phenomenon. These projections may be potentially useful for stakeholders and policymakers, however, an interpretation has to be carried out with caution due to substantial uncertainties originating mainly from concentration scenarios and different responses of climate models to altered radiative forcing. The thesis contributed also to better understanding of RCMs' strengths and weaknesses with respect to simulation of heat waves that might eventually lead to improvements of climate models.

Keywords: heat waves; cold spells; climate change; climate models; Central Europe

Název: Dlouhodobá proměnlivost horkých a studených vln ve střední Evropě

Autor: Mgr. Ondřej Lhotka

Katedra: Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze

Školitel: RNDr. Jan Kyselý, Ph.D., Ústav fyziky atmosféry Akademie věd České republiky

Abstrakt: Horké a studené vlny mají závažné dopady na přírodní prostředí i lidskou společnost. Hlavními cíli této práce je zhodnotit proměnlivost horkých a studených vln v minulosti, analyzovat extremitu nedávných událostí v dlouhodobém kontextu, vyhodnotit simulace horkých vln v klimatických modelech a vytvořit scénáře jejich změn v možném budoucím klimatu. Horké a studené vlny byly posuzovány převážně jako prostorové události za pomoci dat v pravidelné síti uzlových bodů (gridu). Analýza proměnlivosti horkých a studených vln v minulosti a validace regionálních klimatických modelů (RCM) z projektů ENSEMBLES a EURO-CORDEX byly provedeny na základě gridové databáze E-OBS. Byl navržen a otestován index extremity, který zohledňuje teplotu, délku a plošný rozsah jednotlivých horkých a studených vln. Dlouhotrvající horká vlna z roku 1994 byla ve střední Evropě v období 1950–2012 nejvýraznější a léto 2013 bylo nejextrémnější na několika středoevropských stanicích, pokud jde o celkové charakteristiky horkých vln. Nejsilnější studené vlny se vyskytly v letech 1955/1956 a 1962/1963 a zima 2011/2012 byla šestá nejchladnější na základě sumy indexu extremity. Zachycení vlastností horkých vln bylo studováno pomocí ensemblu RCM řízených reanalýzou ERA-40. Modelový průměr odrážel charakteristiky horkých vln poměrně dobře, nicméně byly zjištěny velké rozdíly mezi jednotlivými modely a nesprávné bylo rovněž zachycení meziroční i dlouhodobé proměnlivosti horkých vln. Všechny RCM podcenily intenzitu horké vlny z roku 1994, přičemž tato chyba byla způsobena příliš vydatnými srážkami během horké vlny a před ní. Projekce horkých vln pro možné budoucí klima byly vytvořeny na základě simulací RCM řízených globálními klimatickými modely za použití tří scénářů socio-ekonomického vývoje. V blízké budoucnosti (2020–2049) modely simulují dvojnásobnou četnost horkých vln v porovnání s historickým obdobím, přičemž tento nárůst je podobný pro všechny scénáře koncentrací skleníkových plynů. Na druhou stranu, na konci 21. století (2070–2099) je četnost horkých vln silně závislá právě na výše zmíněných scénářích. V tomto období modely simulují 3–4 horké vlny za sezónu v porovnání s méně než jednou v historickém období a intenzivní horké vlny se objevují pravidelně. Tyto projekce by mohly být potenciálně užitečné pro politické činitele i další zúčastněné strany, nicméně je nutná opatrná interpretace z důvodu velkých nejistot plynoucích ze scénářů koncentrací skleníkových plynů a různého chování klimatických modelů při změně radiačního působení. Tato práce rovněž přispěla k lepšímu pochopení silných a slabých stránek RCM s ohledem na simulaci horkých vln, což může být použito i ke zlepšování klimatických modelů.

Klíčová slova: horké vlny; studené vlny; změna klimatu; klimatické modely; střední Evropa

1 Introduction and motivation

Heat waves and cold spells are important phenomena of the European climate. These events are traditionally regarded as summer (winter) periods that last several days with weather conditions excessively hotter (colder) than normal. Heat waves have major consequences for the natural environment and society. Beniston et al. (2007) pointed to excess illness and mortality, livestock and wildlife stress, crop damage, spread of pests and increased energy demand for cooling. More specifically, the hot summer of 2003 in France resulted in tens of thousands excess deaths (Robine et al. 2008), reduced crop yields, decreased plant productivity (Bastos et al. 2014) and record-breaking loss of Alpine glaciers mass (De Bono et al. 2004). Analogous impacts were observed during the 2010 Russian heat wave (Barriopedro et al. 2011) and numerous wildfires triggered by this event caused prolonged episodes of extreme air pollution in several Russian cities (Konovalov et al. 2011). Among other impacts, cold spells affect human health, infrastructure, and vegetation (Vavrus et al. 2006; Barnett et al. 2012).

Since the beginning of the 20th century, two major episodes of heightened heat wave severity were observed in Europe. The first one occurred in the 1940s and 1950s and was especially pronounced over Western Europe (Della-Marta et al. 2007; Kysely 2008) and the second, ongoing period began in the 1990s. The most notable European events since the 1990s are the 1994, 2003, 2007, 2010, and 2015 heat waves (Russo et al. 2015). The past 25 years are exceptional also in the long-term context. Kysely (2010) analysed a temperature series from Prague-Klementinum (1775–2006) and the turn of the 20th century was found to be the most extreme according to the severity of heat waves. Research articles dealing with temporal variability of cold spells are considerably less frequent compared to those concerning heat waves. According to Kysely (2008), the most severe cold spells since the beginning of the 20th century occurred in the 1940s over most European areas. Other notable events were observed in winter 1962/1963 (Cattiaux et al. 2010), in February 1956, in January 1987 (Walsh and Phillips 2001) and in winter 2009/2010 (Cattiaux et al. 2010). Although severity of cold spells shows negative trend since the 1940s, this decline is smaller compared to the increase of heat wave severity (Kysely 2008).

The development of both heat waves and cold spells in Europe is related to an interruption of prevailing zonal flow (Cattiaux et al. 2012) which is linked to atmospheric blocking (Barriopedro et al. 2006). Atmospheric blocks are formed by quasi-stationary anticyclones lasting one week or more (Buehler et al. 2011). An occurrence of these blocks is linked to

Rossby wave breaking events (Altenhoff et al. 2008), driven by large-scale meanders in the upper troposphere jet stream. Shubert et al. (2011) demonstrated a key role of atmospheric blocking in development of the 2003 and 2010 heat waves, and Schneider et al. (2012) concluded that the blocking high over western Russia lasted more than twice as long as the mean blocking duration for summer in this region. Heat waves can be amplified by a soil moisture deficit that results in a reduced latent cooling and therefore increased daily maximum temperature. The majority of severe European heat waves were preceded by spring precipitation deficit (Fischer et al. 2007; Barriopedro et al. 2011).

The severity of cold spells is well correlated with the North Atlantic Oscillation index (NAO) that expresses the strength of a zonal flow (Scaife et al. 2005) and an occurrence of cold spells is linked to specific circulation patterns (Kyselý 2008). In addition, winter atmospheric circulation is modulated by quasi-periodical changes in solar activity (Barriopedro et al. 2008; Huth et al. 2008). Beside atmospheric circulation, the severity of cold spells may be amplified by snow cover albedo feedback. Plavcová and Kyselý (2016) showed that the frequency of north-eastern cyclonic synoptic types, which are linked to snowfall (Bednorz 2011), is significantly increased before the onset of cold spells in Central Europe.

Due to an expected rise in global mean air temperature (IPCC 2013), there are concerns that losses caused by heat waves will be increasing. Although cold spells are expected to become less pronounced in the warming climate, Francis and Vavrus (2012) pointed out that possible future strengthening of atmospheric blocking over the Euro-Atlantic region due to Arctic Amplification may result in an intensification of cold spells. In addition, cold spells may be intensified due to modified wintertime atmospheric circulation triggered by a possible decrease of solar activity in coming decades (Abreu et al. 2008). Inasmuch as these extreme events are expected to be more severe and dangerous in a future climate, it is vitally important to understand all their aspects in order to establish suitable adaptation and mitigation strategies.

2 Work objectives

A general aim of this thesis is to study variability of heat waves and cold spells in the past, present, and possible future climate. The study is conducted over Central Europe, which was affected by several extraordinary events in recent years. The aim of the thesis is achieved through completing four work packages (WPs) listed below:

- WP1: Analysing temporal variability of heat waves and cold spells using (i) meteorological stations with long-term measurements and (ii) gridded data that allow investigating the spatial extent of these events
- WP2: Describing the most prominent heat waves and cold spells and assessing the extremity of recent events in a long-term context
- WP3: Evaluating the capability of regional climate models (RCMs) to simulate heat waves in a historical climate and identifying possible sources of errors
- WP4: Investigating possible changes of frequency and characteristics of heat waves in a future climate under various concentration scenarios

3 Study area, data and methods

Heat waves and cold spells are analysed over Central Europe, which is defined to encompass more than 600,000 km² approximately between 47–53°N and 8–22°E. According to Köppen-Geiger climate classification, almost entire Central Europe has warm temperate and fully humid climate with warm summers (type Cfb), while the rest of the region exhibits snow and fully humid climates (type Df) in mountainous areas (Kottek et al. 2006). An analysis of heat waves and cold spells is carried out with emphasis on their spatial extent using E-OBS gridded data set (Haylock et al. 2008), because this characteristic was not often considered in previous studies. In addition, use of gridded data sets is suitable for evaluating climate models that provide spatial fields of meteorological variables. Nevertheless, ‘point’ station data is also utilised in order to assess the magnitude of recent severe heat waves on a centennial scale, because no high-quality gridded data is available for these long-term analyses.

Changes in heat waves in a possible future climate are analysed with respect to related uncertainties originating from the selection of concentration scenarios, combinations of RCM × GCM*, and climate models’ spatial resolution. Previous studies that analysed heat waves or cold spells in a possible future climate did not evaluate these uncertainties in detail. An emphasis is given to heat waves as these are regarded as a larger threat in the context of climate change compared to cold spells, and partly because the occurrence of cold spells is also related to extraterrestrial effects, which are not taken into account in present climate

* Global Climate Model

models. Before assessing changes of heat waves under climate change scenarios, the capability of climate models to simulate these events is evaluated. Identifying strengths and weaknesses of climate models is vital for credible interpretation of simulated heat waves in a possible future climate.

Due to relatively complex climate of Central Europe, heat waves and cold spells were defined in this thesis using relative quantile-based thresholds. To describe the severity of individual heat waves and cold spells, an extremity index was proposed. The extremity index is defined as a sum of positive T_{\max} (negative T_{\min})* daily deviations from a given quantile during all heat wave (cold spell) days, scaled by the total number of grid points over Central Europe. This index captures joint effects of temperature, length, and spatial extent of an individual heat wave or cold spell.

4 Results and discussion

4.1 Interannual variability of heat waves and cold spells

Over the 1950–2012 period, 18 heat waves and 24 cold spells were found over Central Europe. The most severe heat waves (according to extremity index) occurred from 23 July to 6 August 1994 and during 18–28 July 2006. These two heat waves were markedly above the others by their extremity index, spatial extent, and duration (no other heat wave lasted longer than 5 days). By far the most severe cold spell over Central Europe occurred in February 1956. In addition to its large value of the extremity index, this event had the greatest temperature amplitude, its core affected the whole of Central Europe, and it persisted for 11 days. In general, cold spells exhibited significantly larger values of extremity index and temperature amplitude compared to heat waves due to greater temperature variance in winter over Europe (Cattiaux et al. 2012) and the negatively-skewed winter T_{\min} distribution (Toth and Szentimrey 1989). Thus, the left tail of the winter T_{\min} distribution has a greater potential for developing extreme temperatures than does the right tail of the summer T_{\max} distribution.

The most-severe 1994 heat wave (Figure 1a) is characterized by a large temperature pattern with a centre in Poland and its core (the area where the sum of positive T_{\max} deviations is greater than 10°C) covered Denmark, southern Sweden, Germany, north-eastern France, the Czech Republic, Austria, Slovakia, Hungary, Lithuania, Latvia, western Belarus, and western Ukraine. By contrast, the most-severe cold spell in February 1956 exhibited extreme cold

* T_{\max} – daily maximum temperature; T_{\min} – daily minimum temperature

anomalies over a large area of France, Switzerland, Germany, Austria, the Czech Republic, and Poland (Figure 1b).

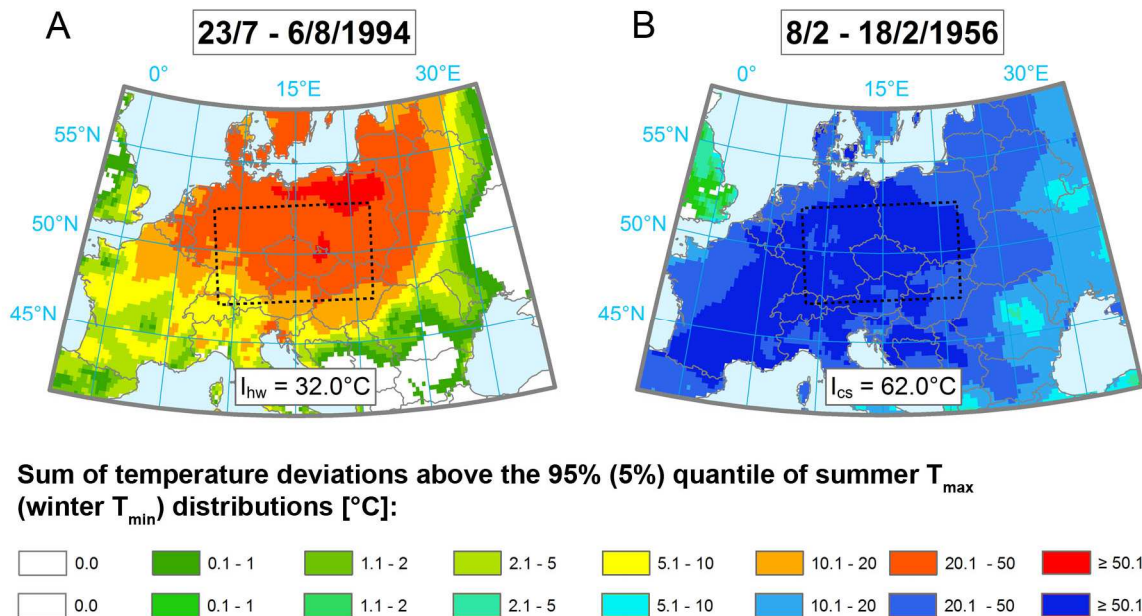


Figure 1: The most severe heat wave and cold spell over Central Europe in the 1950–2012 period. Spatial patterns of the sum of positive T_{max} (negative T_{min}) deviations above (below) the 95% (5%) quantile of summer T_{max} (winter T_{min}) distribution are plotted.

The extremity of heat waves in summer 2013 was assessed using a long-term station data. In Kremsmuenster and Graz (Austria), seasonal characteristics of heat waves were largest for the entire period of observation. At Milesovka (Czech Republic), Wien (Austria), Hurbanovo (Slovakia), Ljubljana (Slovenia), and Zagreb (Croatia), seasonal characteristics of heat waves in 2013 were ranked as the second or the third largest. Although inhomogeneities in long-term European data sets were identified (Wijngaard et al. 2003) and some stations are influenced by an urban heat island, the largest severity of the recent heat waves is evident at the majority of examined locations, including stations on a mountain summit and in small towns, and thus it is quite robust.

4.2 Evaluation of heat waves in RCM simulations

An ensemble of 7 RCM runs driven by the ERA-40 reanalysis (Uppala et al. 2005) from the ENSEMBLES project (van der Linden and Mitchell 2009) was evaluated. The multi-model mean reflected the observed characteristics of heat waves quite well, but considerable

differences were found among the individual RCMs. The RCMs had a tendency to simulate too many heat waves that were shorter but their temperature peak was more pronounced on average compared to E-OBS. Deficiencies were found also in reproducing interannual and interdecadal variability of heat waves. A magnitude of the most severe Central European heat wave that occurred in 1994 was underestimated in all RCMs (Figure 2).

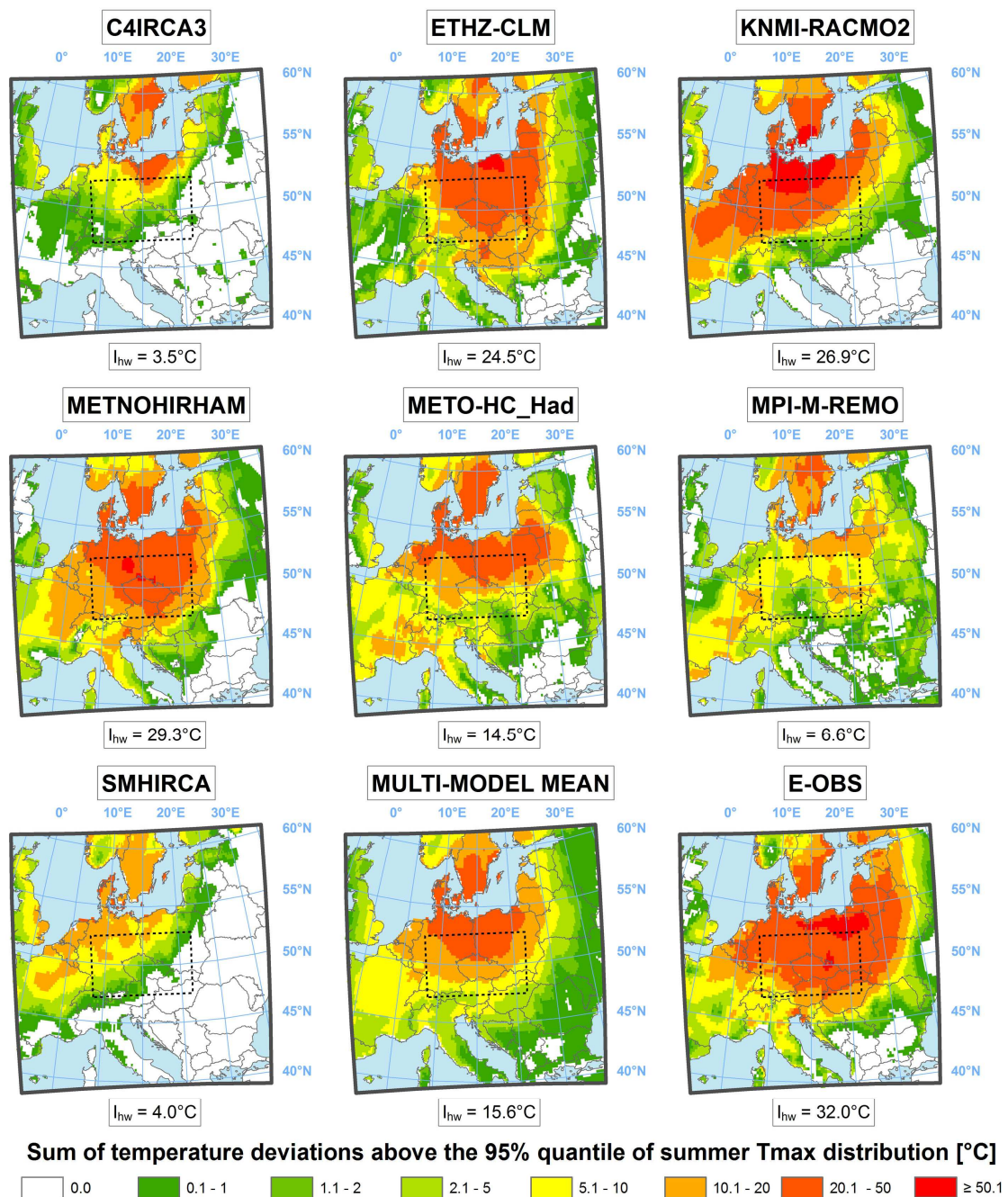


Figure 2: Maps of positive T_{max} deviations between 23 July and 6 August 1994 for each RCM, the multi-model mean and E-OBS.

Since RCMs driven by the ERA-40 reanalysis reproduce persistence of weather regimes (Sanchez-Gomez et al. 2009) and flow indices (Plavcová and Kyselý 2012) over Central Europe relatively well, we focused on land–atmosphere coupling as a possible driver for the errors in simulations of this event. Pronounced overestimation of precipitation amount during the period of the 1994 heat wave was identified in all RCM simulations that considerably underestimated the magnitude of the temperature pattern (4 out of 7), while the simulated precipitation was much closer to reality in the 3 RCMs that captured the 1994 heat wave reasonably well (ETHZ-CLM, KNMI-RACMO2, and METNOHIRHAM). This is in accordance with Fischer et al. (2007), who emphasized the importance of realistically simulating soil-moisture conditions in RCMs for the development of heat waves.

4.3 Climate change scenarios of heat waves and their uncertainties

In order to assess possible changes in Central European heat waves under climate change scenarios along with related uncertainties, 62 RCM simulations from the ENSEMBLES and EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014) projects were analysed. In the near future (2020–2049) simulations, the frequency of heat waves is projected to be nearly twice higher compared to the historical period, while the frequency of severe heat waves increases by a factor of 2–3 (Figure 3). The largest uncertainty originates from the selection of models, because differences between the concentration scenarios are small in this period, and the largest effective radiative forcing in the high-concentration RCP 8.5 is not associated with the highest frequency of heat waves.

Changes of heat wave and severe heat wave frequencies are clearly linked to the concentration scenarios in the late 21st century time slice (2070–2099). The largest increases of these events are found in simulations driven by high-concentration RCP 8.5. In these groups, the frequency of heat waves is projected to be enhanced by a factor of 4–5 compared to the historical simulations, indicating 3–4 heat waves per year on average at the end of the 21st century. By contrast, the increase in the heat wave occurrence is roughly halved under the low-concentration RCP 4.5 scenario (about two heat waves per year on average). Simulations with the SRES A1B scenario project an increase between the two RCP scenarios, which is in line with the average effective radiative forcing for 2070–2099.

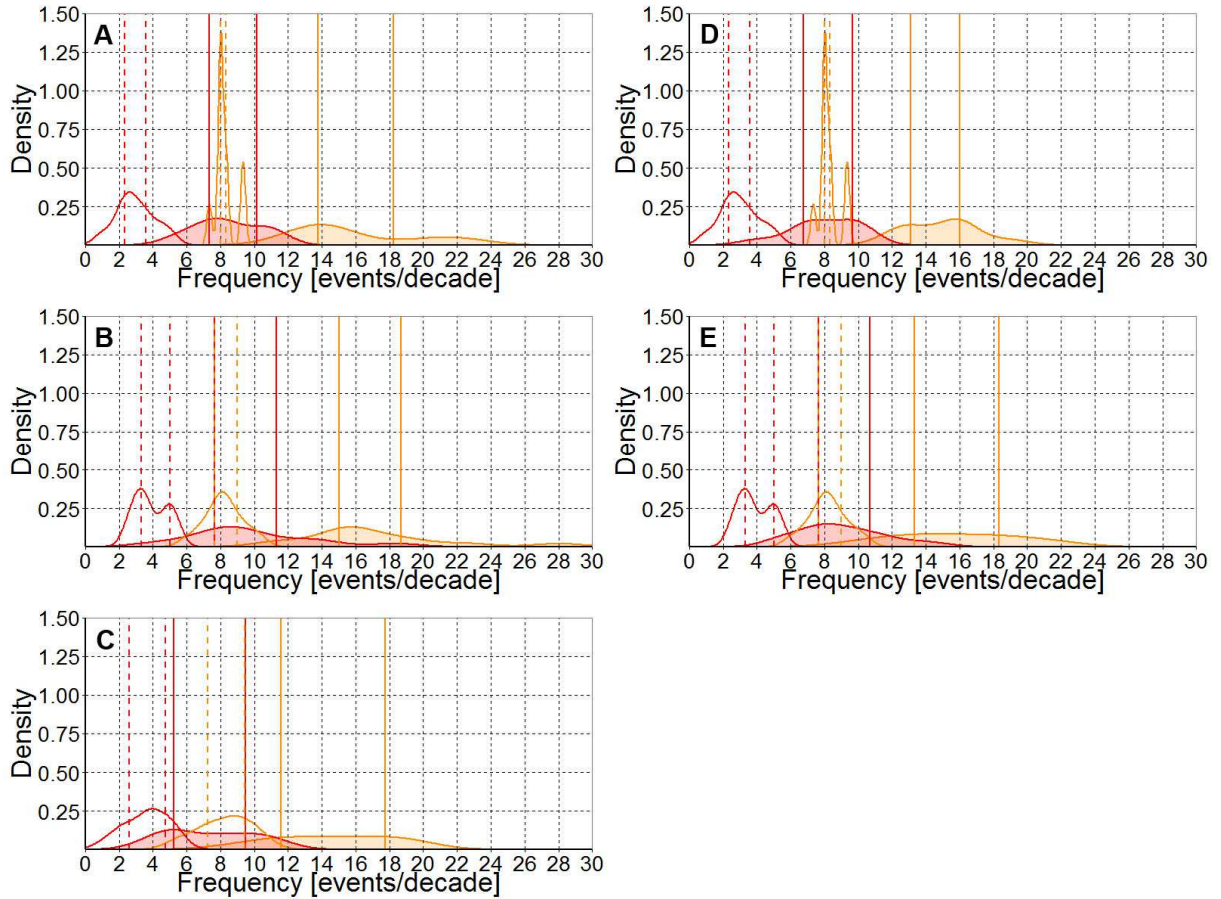


Figure 3: Probability density functions (PDFs) of heat waves (orange) and severe heat waves (red) frequencies for (A, B) EURO-CORDEX models (12.5 and 50 km grid) forced by the RCP 4.5 scenario, (C) ENSEMBLES models forced by the SRES A1B scenario and (D, E) EURO-CORDEX models (12.5 and 50 km grid) forced by the RCP 8.5 scenario. Solid vertical lines delimit the interquartile ranges of model simulations for the near future while dashed vertical lines represent the interquartile ranges of model simulations for the historical runs.

5 Conclusions and future perspectives

According to IPCC (2013), it is virtually certain that there will be more frequent hot and fewer cold temperature extremes over most land areas, and it is very likely that heat waves will occur with a higher frequency and duration in a possible future climate. The thesis aimed to strengthen the evidence from the observed data, critically evaluated the capability of climate models to simulate heat waves, and constructed climate change scenarios for heat waves over Central Europe. Principal outcomes of the doctoral dissertation are summarized as follows:

- The extremity index of heat waves (cold spells) was proposed and tested over Central Europe. This index is based on joint effects of temperature magnitude, duration, and spatial extent of individual events. Because it involves no ‘local’ settings, it may be applied also in other regions and data sets. The extremity index was found suitable for evaluating magnitude of heat waves in climate models and a similar index may be also used to assess severity of droughts, persistent rainfall, snowfall and other meteorological hazards.
- The list of severe heat waves and cold spells that occurred over Central Europe since 1950 was established. Spatial patterns of temperature anomalies for each event were visualized in maps, and heat waves (cold spells) were classified into four groups based on their characteristics. The methodology enables updating the list when a new version of the E-OBS data set is released. Enlisted events may be used as future analogues for comparison with simulated heat waves and cold spells in climate models and for other purposes. The list may also be broadened by including additional information about each event (observed losses, driving factors, etc.)
- Regional climate models driven by the reanalysis tend to underestimate the magnitude of the extraordinary 1994 heat wave. Those errors were linked to simulation of precipitation, because the RCM that considerably underestimated the magnitude of the 1994 heat wave substantially overestimated the precipitation amount during this event. Inasmuch as extraordinary heat waves are expected to become one of the largest hazards of global climate change, their improper simulation is a serious deficiency of current climate models.
- Heat wave scenarios for a possible future Central European climate were constructed. In the near future (2020–2049), the mean projected frequency of heat waves is nearly twice higher (15 events/decade) compared to the historical period and this value is similar in all concentration scenarios. By contrast, the projected frequency of heat waves in the late 21st century (2–4 events/summer, 2070–2099) depends largely on concentration scenarios, so the climate change mitigation strategies are projected to be effective rather in the long term. However, it is possible to implement suitable adaptation strategies, such as those recommended by the European Climate Adaptation Platform (<http://climate-adapt.eea.europa.eu>), which would partially reduce impacts of heat waves in a changing climate.

References

- Abreu JA, Beer J, Steinhilber F, et al. (2008) For how long will the current grand maximum of solar activity persist? *Geophys Res Lett* 35:L20109. doi: 10.1029/2008GL035442
- Altenhoff AM, Martius O, Croci-Maspoli M, et al. (2008) Linkage of atmospheric blocks and synoptic-scale Rossby waves: a climatological analysis. *Tellus A* 60:1053–1063. doi: 10.1111/j.1600-0870.2008.00354.x
- Bastos A, Gouveia CM, Trigo RM, Running SW (2014) Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe. *Biogeosciences* 11:3421–3435. doi: 10.5194/bg-11-3421-2014
- Barnett AG, Hajat S, Gasparri A, Rocklöv J (2012) Cold and heat waves in the United States. *Environ Res* 112:218–224. doi: 10.1016/j.envres.2011.12.010
- Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, et al. (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science* (80-) 332:220–224. doi: 10.1126/science.1201224
- Barriopedro D, García-Herrera R (2006) A Climatology of Northern Hemisphere Blocking. *J Clim* 19:1042–1063.
- Barriopedro D, García-Herrera R, Huth R (2008) Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking. *J Geophys Res* 113:D14118. doi: 10.1029/2008JD009789
- Bednorz E (2011) Synoptic conditions of the occurrence of snow cover in central European lowlands. *Int J Climatol* 31:1108–1118. doi: 10.1002/joc.2130
- Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, et al. (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim Change* 81:71–95. doi: 10.1007/s10584-006-9226-z
- Buehler T, Raible CC, Stocker TF (2011) The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40. *Tellus A* 63:212–222. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00492.x
- Cattiaux J, Vautard R, Cassou C, et al. (2010) Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophys Res Lett* 37:L20704. doi: 10.1029/2010GL044613
- Cattiaux J, Yiou P, Vautard R (2012) Dynamics of future seasonal temperature trends and extremes in Europe: a multi-model analysis from CMIP3. *Clim Dyn* 38:1949–1964. doi: 10.1007/s00382-011-1211-1
- Della-Marta PM, Haylock MR, Luterbacher J, Wanner H (2007) Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *J Geophys Res* 112:D15103. doi: 10.1029/2007JD008510

- Fischer EM, Seneviratne SI, Lüthi D, Schär C (2007) Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys Res Lett* 34:L06707. doi: 10.1029/2006GL029068
- Francis JA, Vavrus SJ (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys Res Lett* 39:L06801. doi: 10.1029/2012GL051000
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, et al. (2008) A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J Geophys Res* 113:D20119. doi: 10.1029/2008JD010201
- Hurrell JW, Deser C (2010) North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *J Mar Syst* 79:231–244. doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.11.002
- Huth R, Kyselý J, Bochníček J, Hejda P (2008) Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe. *Ann Geophys* 26:1999–2004.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, et al. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Chang* 14:563–578. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2
- Konovalov IB, Beekmann M, Kuznetsova IN, et al. (2011) Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: Integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmos Chem Phys* 11:10031–10056. doi: 10.5194/acp-11-10031-2011
- Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Zeitschrift* 15:259–263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Kyselý J (2008) Influence of the persistence of circulation patterns on warm and cold temperature anomalies in Europe: Analysis over the 20th century. *Glob Planet Change* 62:147–163. doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.01.003
- Kyselý J (2010) Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect? *Int J Climatol* 109:89–109. doi: 10.1002/joc1874
- Plavcová E, Kyselý J (2012) Atmospheric circulation in regional climate models over Central Europe: links to surface air temperature and the influence of driving data. *Clim Dyn* 39:1681–1695. doi: 10.1007/s00382-011-1278-8
- Plavcová E, Kyselý J (2016) Overly persistent circulation in climate models contributes to overestimated frequency and duration of heat waves and cold spells. *Clim Dyn* 46:2805–2820. doi: 10.1007/s00382-015-2733-8
- Robine J-M, Cheung SLK, Le Roy S, et al. (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol* 331:171–178. doi: 10.1016/j.crvi.2007.12.001

- Russo S, Sillmann J, Fischer EM (2015) Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ Res Lett* 10:124003. doi: 10.1088/1748-9326/10/12/124003
- Sanchez-Gomez E, Somot S, Déqué M (2009) Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Clim Dyn* 33:723–736. doi: 10.1007/s00382-008-0502-7
- Scaife AA, Knight J, Vallis G, Folland C (2005) A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophys Res Lett* 32:L18715. doi: 10.1029/2005GL023226
- Schneidereit A, Schubert S, Vargin P, et al. (2012) Large-Scale Flow and the Long-Lasting Blocking High over Russia: Summer 2010. *Mon Weather Rev* 140:2967–2981. doi: 10.1175/MWR-D-11-00249.1
- Schubert S, Wang H, Suarez M (2011) Warm Season Subseasonal Variability and Climate Extremes in the Northern Hemisphere: The Role of Stationary Rossby Waves. *J Clim* 24:4773–4792. doi: 10.1175/JCLI-D-10-05035.1
- Toth Z, Szentimrey T (1989) The binormal distribution: A distribution for representing asymmetrical but normal-like weather elements. *J Clim* 3:128–136.
- Toth Z, Szentimrey T (1989) The binormal distribution: A distribution for representing asymmetrical but normal-like weather elements. *J Clim* 3:128–136.
- Uppala SM, Kallberg PW, Simmons AJ, et al. (2005) The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc* 131:2961–3012. doi: 10.1256/qj.04.176
- van der Linden P, Mitchell JFB (2009) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter
- Vavrus S, Walsh JE, Chapman WL, Portis D (2006) The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *Int J Climatol* 26:1133–1147. doi: 10.1002/joc.1301
- Walsh J, Phillips A (2001) Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948-99. *J Clim* 14:2642–2658.
- Wijngaard JB, Klein Tank a. MG, Konnen GP (2003) Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int J Climatol* 23:679–692. doi: 10.1002/joc.906

Mgr. ONDŘEJ LHOTKA (* 1988)

e-mail: ondrej.lhotka@natur.cuni.cz

Education:

2012–present **PhD student of Physical Geography and Geoecology
Faculty of Science, Charles University in Prague**

PhD project: Long-term variability of heat waves and cold spells in Central Europe

2010–2012 Master's degree in Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University in Prague

2007-2010 Bachelor's degree in Geography and Cartography, Faculty of Science, Charles University in Prague

Student project investigator:

- Climate change scenarios of heat wave characteristics in Central Europe – magnitude and uncertainties (Grant Agency of Charles University, no. 250215, 2015-2016)
- Extremity index of heat waves and cold spells in Central Europe (Grant Agency of Charles University, no. 532313, 2013-2014)

Professional courses:

- Scientific project writing course administered by Global Change Research Centre (2015)
- Course in the fundamentals of research work in The Czech Academy of Sciences (2013)

Work Experience:

2014–present PhD student, **Global Change Research Centre, CAS**

2012–present PhD student, **Institute of Atmospheric Physics, CAS**

Participation in projects:

Spatial and temporal characteristics of heat waves and cold spells in climate model simulations (Czech Science Foundation, 16-22000S, 2016-2018; Principal investigator: J. Kyselý)

Reproduction of links between atmospheric circulation and surface air temperature and precipitation distributions in climate models (Czech Science Foundation, P209/10/2265, 2010-2014; Principal investigator: J. Kyselý)

Computer skills:

Geoinformatics (GIS) and cartography – ArcGIS, Surfer, MapInfo, OCAD

Remote sensing – PCI Geomatica

Statistical software – cran R

MS Windows, MS Office – Excel, Word, Power Point

Foreign language skills:

English: upper-intermediate - B2, FCE certificate

French: beginner

German: beginner

Publications in IF journals:

Lhotka, O., Kyselý, J. (2015) Hot Central-European summer of 2013 in a long-term context. *Int. J. Climatol.* 35, 4399-4407. DOI: 10.1002/joc.4277

Lhotka, O., Kyselý, J. (2015) Spatial and temporal characteristics of heat waves over Central Europe in an ensemble of regional climate model simulations. *Clim. Dynam.* 45, 2351-2366. DOI: 10.1007/s00382-015-2475-7

Lhotka, O., Kyselý, J. (2015) Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe. *Int. J. Climatol.* 35, 1232-1244. DOI: 10.1002/joc.4050

Rusticucci, M., Kyselý, J., Almeida, G., Lhotka, O. (2016) Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theor Appl Climatol* 124, 679-689. DOI: 10.1007/s00704-015-1445-7

Conference proceedings:

Lhotka, O., Kyselý, J., Farda, A. (2015) Heat waves over Central Europe in ALADIN-Climate/CZ regional climate model: evaluation and future projections. In: *Global Change: A Complex Challenge : Conference Proceedings*. Brno, Global Change Research Centre CAS, p. 14-17, ISBN 978-80-87902-10-3.

Lhotka, O., Kyselý, J. (2014) Atmospheric circulation and precipitation in regional climate models during major heat waves in Central Europe. In: *3rd International Lund Regional-Scale Climate Modelling Workshop: 21st Century Challenges in Regional Climate Modelling - Workshop Proceedings*. Lund, International Baltic Earth Secretariat Publications, p. 240-241, ISSN 2198-4247.

Lhotka, O., Kyselý, J. (2013) Analysis of temporal variability and spatial characteristics of heat waves in central Europe using extremity index. In: *Global Change and Resilience: From Impacts to Responses: Proceedings of the 3rd annual Global Change and Resilience Conference*. Brno, Global Change Research Centre AS CR, p. 105-109, ISBN 978-80-904351-8-6.

1 Úvod a motivace

Horké a studené vlny jsou významným rysem evropského klimatu. Tyto události jsou většinou definovány jako několikadenní období v létě (zimě) s extrémně horkým (studeným) počasím. Horké vlny mají závažné dopady na přírodní prostředí i lidskou společnost. Beniston et al. (2007) zmiňuje zvýšenou nemocnost a úmrtnost, stres pro hospodářská i volně žijící zvířata, poškození zemědělských plodin, šíření škůdců a nadměrná spotřeba elektrické energie pro potřeby chlazení. Během horkého léta 2003 ve Francii bylo zaznamenáno desetitisíce úmrtí z horka (Robine et al. 2008), snížené výnosy zemědělských plodin, nižší produktivita rostlin (Bastos et al. 2004) a rekordní ústup ledovců v Alpách (De Bono et al. 2004). Analogické dopady byly pozorovány během horké vlny z roku 2010 v Rusku (Barriopedro et al. 2011) a navíc velké množství lesních požárů zapříčinilo extrémní znečištění vzduchu v několika ruských městech (Konovalov et al. 2011). Studené vlny mají mimo jiné negativní vliv na lidské zdraví, infrastrukturu a vegetaci (Vavrus et al. 2006; Barnett et al. 2012).

Od počátku 20. století byla v Evropě zaznamenána dvě období zvýšeného výskytu horkých vln. První nastalo ve čtyřicátých a padesátých letech a bylo výrazné převážně v západní Evropě (Della-Marta et al. 2007; Kyselý 2008), zatímco druhé, stále probíhající období začalo v devadesátých letech. Nejintenzivnější horké vlny v tomto období se vyskytly v letech 1994, 2003, 2007, 2010 a 2015 (Russo et al. 2015). Posledních 25 let je výjimečných i v dlouhodobém kontextu. Kyselý (2010) analyzoval teplotní řadu ze stanice Praha-Klementinum (1775–2006) a přelom 20. a 21. století byl nejextrémnější z hlediska intenzity horkých vln. Vědecké články zabývající se proměnlivostí studených vln jsou méně časté v porovnání s těmi, které se věnují horkým vlnám. Podle Kyselého (2008) se nejvýraznější studené vlny v Evropě od počátku dvacátého století vyskytly ve čtyřicátých letech. Další významné události byly zaznamenány v únoru 1956, v zimě 1962/1963, v lednu 1987 a v zimě 2009/2010 (Walsh a Phillips 2001; Cattiaux et al. 2010). Ačkoliv intenzita studených vln v Evropě vykazuje od čtyřicátých let 20. století záporný trend, tento pokles je nižší než rostoucí trend intenzity horkých vln (Kyselý 2008).

Vznik horkých a studených vln je spjat s přerušáním převládajícího zonálního proudění nad Evropou (Cattiaux et al. 2012), což má souvislost s tzv. atmosférickým blokováním. Atmosférické bloky jsou tvořeny kvazi-stacionárními anticyklónami trvajících týden a více (Buehler et al. 2011) a výskyt těchto bloků je vázán na Rossbyho atmosférické vlny (Altenhoff et al. 2008), které jsou tvořeny meandry velkého měřítká v tryskovém proudění v horní troposféře. Podle Shuberta (2011) atmosférické blokování hrálo klíčovou roli ve

vývoji horkých vln z roku 2003 a 2010 a Schneidereit et al. (2012) zjistil, že blokující anticyklóna nad západním Ruskem se vyskytovala dvakrát delší dobu, než je v létě v tomto regionu obvyklé. Horké vlny mohou být zesíleny deficitem půdní vlhkosti, který vede k nárůstu teploty skrze omezené množství energie přeměněné na latentní teplo. Většině výrazných horkých vln v Evropě deficit půdní vlhkosti předcházela (Fischer et al. 2007; Barriopedro et al. 2011).

Intenzita studených vln je v dobré korelaci s indexem Severoatlantické oscilace (NAO), který vyjadřuje sílu zonálního proudění (Scaife et al. 2005) a výskyt studených vln je vázán na určité cirkulační typy (Kyselý 2008). Atmosférická cirkulace je navíc v zimě ovlivňována kvazi-periodickými změnami sluneční aktivity (Barriopedro et al. 2008; Huth et al. 2008). Kromě atmosférické cirkulace je intenzita studených vln závislá na přítomnosti sněhové pokrývky. Plavcová a Kyselý (2016) zjistili, že četnost severovýchodních cirkulačních typů, které jsou spjaty s vydatným sněžením (Bednorz 2011), je před začátkem studených vln ve střední Evropě významně zvýšena.

Z důvodu předpokládaného nárůstu globální teploty (IPCC 2013) panují obavy, že se dopady horkých vln budou zvyšovat. Přestože se obecně očekává pokles intenzity studených vln v teplejším klimatu, Francis a Vavrus (2012) upozornili na možné zesílení atmosférického blokování v Euro-Atlantském regionu z důvodu výrazného oteplování v Arktidě, což může mít za následek závažnější studené vlny, než by odpovídalo zvýšené globální teplotě. Studené vlny mohou být rovněž intenzivnější z důvodu změn v atmosférické cirkulaci způsobených možným poklesem sluneční aktivity v následujících desetiletích (Abreu et al. 2008). Vzhledem k možnému zvýšení intenzity horkých i studených vln v budoucím klimatu, je důležité tyto události lépe poznat za účelem zavedení vhodných adaptačních a mitigačních opatření.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je analyzovat variabilitu horkých a studených vln v minulém, současném a možném budoucím klimatu. Zájmovým územím je střední Evropa, která byla v nedávných letech postižena výraznými horkými i studenými vlnami. Postup v práci je rozdělen do čtyř pracovních bloků (PB) uvedených níže:

- PB1: Analýza časové proměnlivosti horkých a studených vln pomocí (i) meteorologických stanic s dlouhými řadami pozorování a (ii) dat v pravidelné síti uzlových bodů (gridu), které umožňují zkoumat i prostorové aspekty těchto událostí
- PB2: Popis nejvýraznějších horkých a studených vln a vyhodnocení extremity nedávných událostí v dlouhodobém kontextu
- PB3: Zhodnocení schopností regionálních klimatických modelů (RCM) simulovat horké vlny v historickém klimatu a zjistit možné zdroje chyb
- PB4: Analýza změny četnosti a charakteristik horkých vln v možném budoucím klimatu v rámci různých scénářů koncentrací skleníkových plynů

3 Zájmové území, data a metody

Horké a studené vlny jsou vyhodnocovány ve střední Evropě, která je definována na více než 600 000 km², přibližně mezi 47–53° SŠ a 8–22° ZD. Podle Köppen-Geigerovy klasifikace téměř celá střední Evropa leží v mírném a celoročně vlhkém klimatu s teplými léty (typ Cfb), zatímco zbytek regionu v horských oblastech vykazuje rysy sněhového a plně vlhkého klimatu (typ Df, Kottek et al. 2006). Při analýze horkých a studených vln byl kladen důraz na jejich plošný rozsah za použití gridové databáze E-OBS (Haylock et al. 2008), protože tato charakteristika nebyla často v předešlých pracích uvažována. Použití tohoto typu dat je navíc vhodné pro validaci klimatických modelů, jejichž výstupem jsou meteorologické proměnné v prostorové síti. „Bodová“ staniční data jsou nicméně využita pro analýzu extremity nedávných horkých vln v dlouhodobém kontextu, protože žádná kvalitní prostorová data nejsou pro tento typ studie dostupná.

Změny horkých vln v možném budoucím klimatu jsou zkoumány s důrazem na související nejistoty plynoucí z výběru scénáře koncentrací skleníkových plynů, kombinace RCM×GCM* a prostorového rozlišení klimatických modelů. Předchozí studie se totiž nezabývaly těmito nejistotami do detailu. Důraz je kladen na horké vlny, které jsou považovány za větší hrozbu v kontextu klimatické změny v porovnání se studenými vlnami, a navíc výskyt studených vln je ovlivňován změnami sluneční aktivity, které nejsou zahrnuty v současných klimatických modelech. Před analýzou změn horkých vln v rámci scénářů koncentrací skleníkových plynů je vyhodnocena schopnost klimatických modelů správně zachytit tyto události, protože

* Globální klimatický model

identifikace slabých a silných stránek klimatických modelů je důležitá pro správnou interpretaci simulací horkých vln v možném budoucím klimatu.

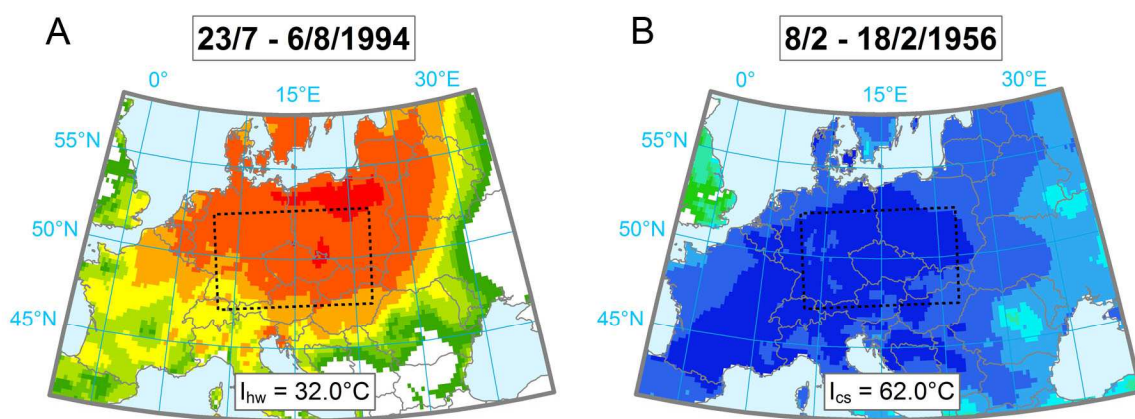
Vzhledem k poměrně komplexnímu klimatu střední Evropy jsou horké a studené vlny v této práci definovány na základě prahových hodnot, založených na určitém kvantilu teplotního rozdělení. Pro popis intenzity jednotlivých horkých vln byl zaveden index extremity, což je suma pozitivních odchylek maximální denní teploty vzduchu od daného kvantilu ve všech uzlových bodech a během všech dnů horké vlny, vážená počtem uzlových bodů ve střední Evropě. Tento index kombinuje teplotu, délku a plošný rozsah jednotlivých horkých a studených vln a je analogicky použit i pro studené vlny.

4 Výsledky a diskuze

4.1 Meziroční proměnlivost horkých a studených vln

V období 1950–2012 bylo ve střední Evropě vymezeno 18 horkých a 24 studených vln. Nejintenzivnější horké vlny (na základě hodnoty indexu extremity) trvaly od 23. července do 6. srpna 1994 a během 18.–28. července 2006. Tyto dvě horké vlny byly výrazně silnější než ostatní události z hlediska indexu extremity, plošného rozsahu a délky (žádná jiná horká vlna nebyla delší než 5 dní). Nejsilnější studená vlna se ve střední Evropě vyskytla v únoru 1956. Kromě vysoké hodnoty indexu extremity měla největší teplotní amplitudu, její jádro zasáhlo celou střední Evropu a trvala 11 dní. Obecně vzato, studené vlny vykazují větší hodnoty indexu extremity a teplotní amplitudy v porovnání s horkými vlnami z důvodu většího rozptylu teplotního rozdělení v zimě než v létě (Cattiaux et al. 2012) a rovněž kvůli záporným hodnotám koeficientu šikmosti (Toth and Szentimrey 1989). Díky tomu je levý okraj teplotního rozdělení v zimě náchylnější k teplotním extrémům v porovnání s pravým okrajem teplotního rozdělení v létě.

Nejsilnější horkou vlnu z roku 1994 (Obrázek 1a) lze charakterizovat jako rozsáhlé pole kladných teplotních odchylek s centrem v Polsku, jehož jádro (oblast, kde je suma kladných teplotních odchylek větší než 10°C) postihlo Dánsko, jižní Švédsko, Německo, severovýchodní Francii, Českou republiku, Rakousko, Slovensko, Maďarsko, Litvu, Lotyšsko, západní Bělorusko a západní Ukrajinu. Nejvýraznější studená vlna v únoru 1956 nejvíce zasáhla Francii, Švýcarsko, Německo, Rakousko, nynější Českou republiku a Polsko (Obrázek 1b).



Sum of temperature deviations above the 95% (5%) quantile of summer T_{\max} (winter T_{\min}) distributions [°C]:



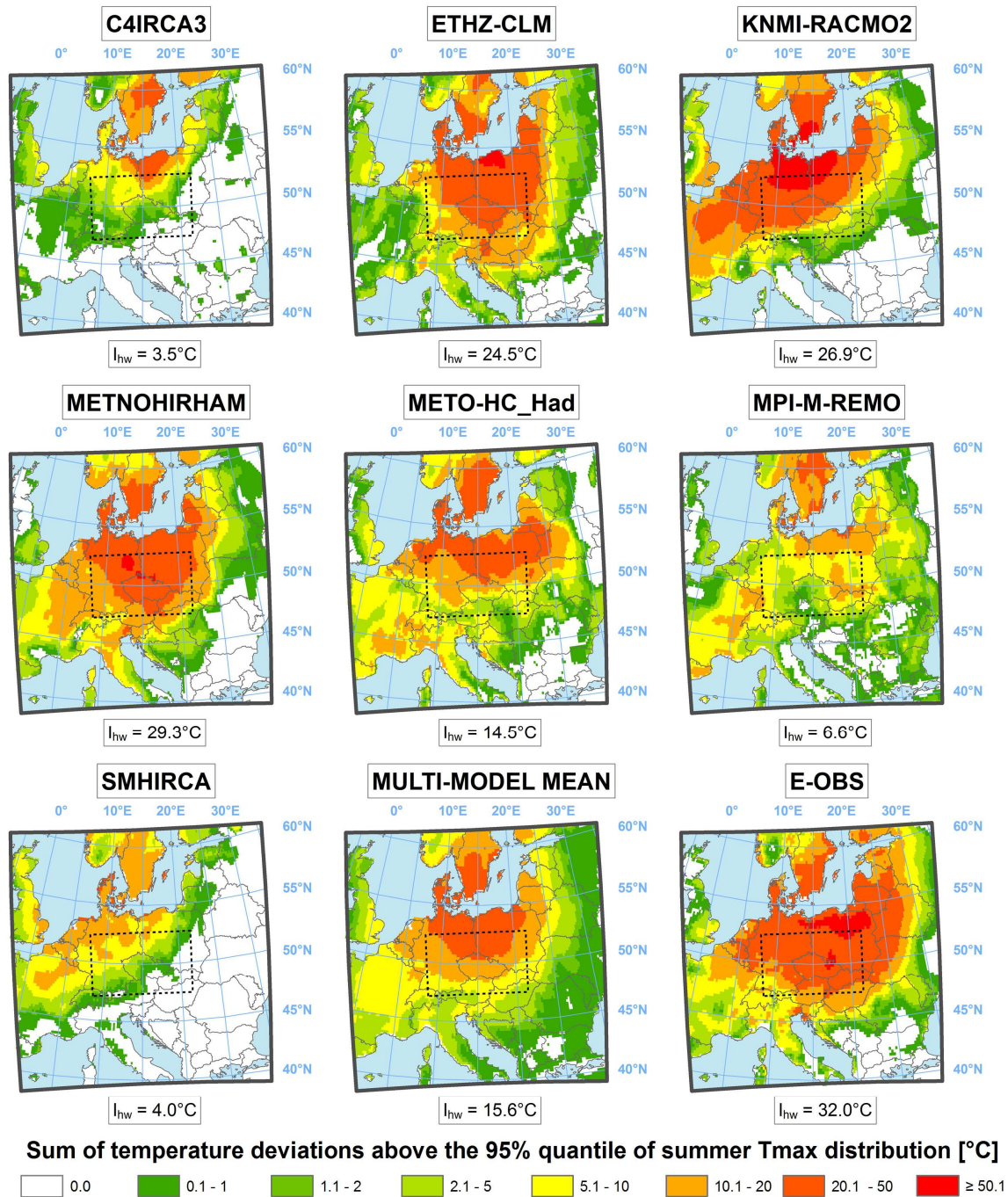
Obrázek 1: Nejvýraznější horká a studená vlna ve střední Evropě v období 1950–2012. Barevná škála zobrazuje pole sumy kladných (záporných) teplotních odchylek od 95% (5%) kvantilu letního (zimního) teplotního rozdělení.

Extremita horkých vln z léta 2013 byla analyzována pomocí dlouhých staničních řad. V Kremsmuensteru a Štýrském Hradci (Rakousko) byly sezónní charakteristiky horkých vln v tomto roce nejvýraznější za celé období pozorování od přelomu 19. a 20. století. Navíc na Milešovce, ve Vídni, Hurbanovu, Lublani a Záhřebu byly sezónní charakteristiky horkých vln v roce 2013 druhé nebo třetí největší. Ačkoliv Wijngaard et al. (2003) našli nehomogenity v evropských staničních řadách s dlouhodobým pozorováním a některé stanice jsou ovlivněny městským tepelným ostrovem, výjimečná extremita nedávných horkých vln je zřejmá na většině zpracovaných stanic včetně těch v horách a malých městech.

4.2 Vyhodnocení simulací horkých vln v regionálních klimatických modelech

Byl vyhodnocen soubor sedmi simulací RCM řízených reanalýzou ERA-40 (Uppala et al. 2005) z projektu ENSEMBLES (van der Linden and Mitchell 2009). Modelový průměr zachytil pozorované charakteristiky horkých vln poměrně dobře, nicméně byly zjištěny značné rozdíly mezi jednotlivými klimatickými modely. RCM měly tendenci simulovat příliš mnoho krátkých horkých vln a navíc jejich teplotní charakteristika byla větší než v případě E-OBS. Nedostatky byly zjištěny také při simulaci meziroční i dlouhodobější proměnlivosti

horkých vln. Intenzita nejzávažnější horké vlny ve střední Evropě z roku 1994 byla podceněna ve všech RCM (Obrázek 2).



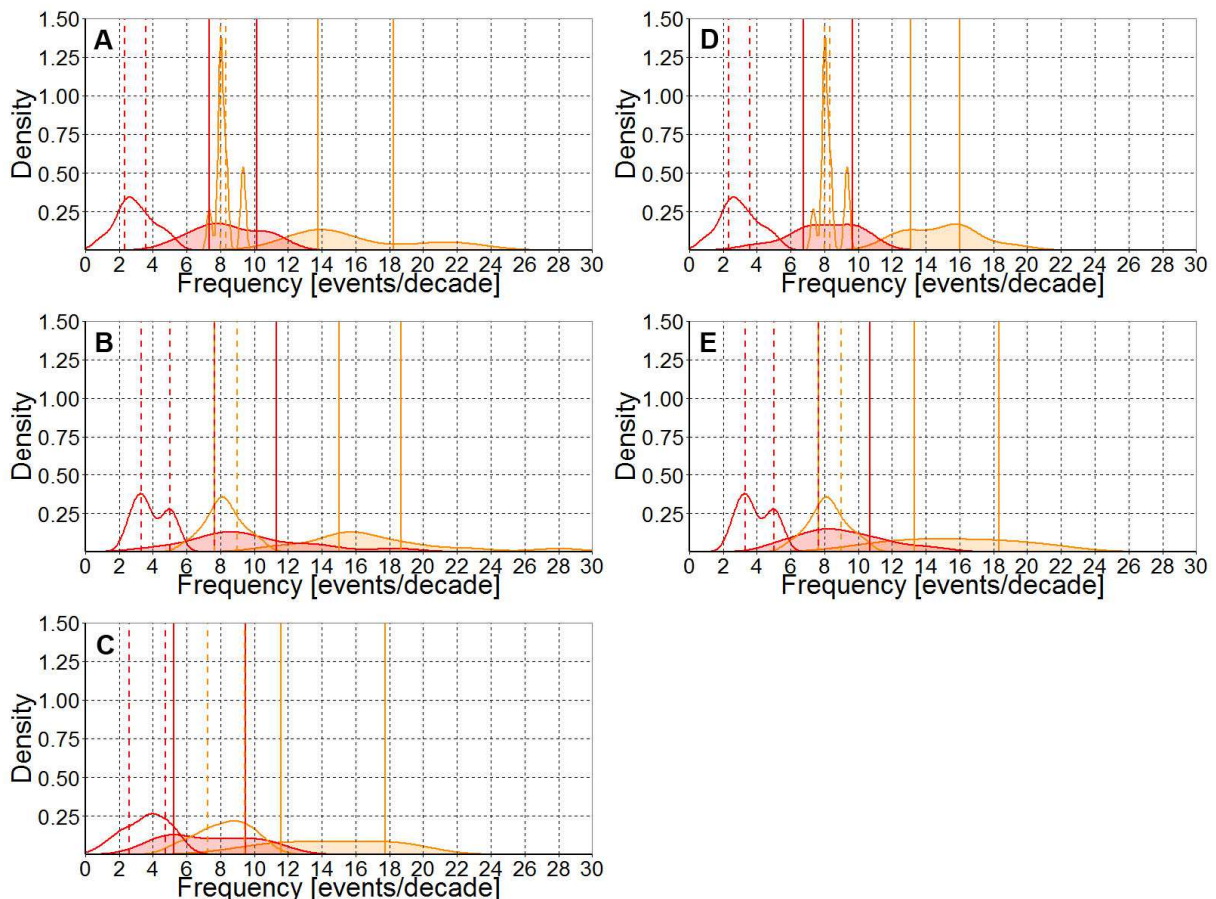
Obrázek 2: Mapy kumulovaných kladných odchylek maximální teploty vzduchu od 95% kvantilu letního teplotního rozdělení mezi 23. červencem a 6. srpnem 1994 pro každý RCM, modelový průměr a E-OBS.

Vzhledem k tomu, že RCM řízené reanalýzou ERA-40 jsou schopny zachytit velkoprostorové proudění (Sanchez-Gomez et al. 2009) i cirkulační indexy (Plavcová a Kyselý 2012) nad střední Evropou poměrně dobře, vazby zemský povrch – atmosféra byly zkoumány jako možná příčina chyb v zachycení horké vlny 1994. Bylo zjištěno velké nadhodnocení srážek během této horké vlny v těch RCM, které výrazně podcenily intenzitu horké vlny, zatímco simulace srážek byla blíže realitě v RCM, které zachytily tuto horkou vlnu poměrně dobře (ETHZ-CLM, KNMI-RACMO2 a METNOHIRHAM). Toto zjištění je v souladu s Fischerem et al. (2007), kteří vyzdvihli důležitost správné simulace půdní vlhkosti pro úspěšné zachycení horkých vln.

4.3 Scénáře horkých vln v budoucím klimatu a jejich nejistoty

Pro vyhodnocení změn horkých vln ve střední Evropě v možném budoucím klimatu a posouzení souvisejících nejistot bylo použito 62 simulací RCM z projektů ENSEMBLES a EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014). V blízké budoucnosti (2020–2049) modely simulují téměř dvakrát větší četnost horkých vln v porovnání s historickým obdobím, přičemž počet závažných horkých vln se zvyšuje dvakrát až třikrát (Obrázek 3). Největší nejistoty pramení z výběru klimatických modelů, jelikož rozdíly mezi scénáři koncentrací skleníkových plynů jsou v tomto období malé a největší radiační působení v rámci scénáře RCP 8.5 (vysoké koncentrace skleníkových plynů) není spjato s největším nárůstem četnosti horkých vln.

Na konci 21. století (2070–2099) jsou změny četnosti horkých vln silně závislé na zvoleném scénáři koncentrací skleníkových plynů. Největší nárůst byl zjištěn v rámci scénáře RCP 8.5, kde je očekáván čtyř- až pětinasobný nárůst počtu horkých vln v porovnání s historickými simulacemi, což znamená v průměru 3–4 horké vlny za sezónu. Na druhou stranu, nárůst horkých vln je zhruba poloviční v rámci scénáře RCP 4.5 s nízkými koncentracemi skleníkových plynů (přibližně dvě horké vlny za sezónu). Simulace v rámci scénáře SRES A1B predikují nárůst horkých vln v hodnotě mezi dvěma výše uvedenými scénáři, což odpovídá průměrnému radiačnímu působení pro období 2070–2099.



Obrázek 3: Funkce hustoty pravděpodobnosti četností všech horkých vln (oranžově) a pouze závažných horkých vln (červeně) pro (A, B) modely EURO-CORDEX (12,5 a 50 km grid) používající scénář RCP 4.5, (C) modely ENSEMBLES se scénářem SRES A1B a (D, E) modely EURO-CORDEX (12,5 a 50 km grid) používající scénář RCP 8.5. Plné svislé čáry označují mezikvartilové rozpětí modelových simulací pro blízkou budoucnost, zatímco přerušované čáry reprezentují mezikvartilové rozpětí pro historické simulace.

5 Závěr a výhledy do budoucna

Podle IPCC (2013) je téměř jisté, že se v budoucím klimatu četnost teplých extrémů zvýší, zatímco u studených dojde k poklesu ve většině regionů, a že horké vlny se budou s velkou pravděpodobností vyskytovat častěji a s delší dobou trvání. Cílem této práce je vyhodnotit proměnlivost horkých a studených vln pomocí pozorovaných dat, kriticky zhodnotit schopnost klimatických modelů simulovat horké vlny a vytvořit scénáře horkých vln v možném budoucím klimatu střední Evropy. Hlavní závěry disertační práce jsou shrnuty níže:

- Byl navržen a otestován index extremity horkých a studených vln pro střední Evropu. Tento index je založen na kombinovaném efektu teplotní charakteristiky, délky trvání a plošném rozsahu jednotlivých událostí. Jelikož index není závislý na hustotě sítě uzlových bodů a místě použití, může být aplikován na jiná data nebo v rámci jiného regionu. Index extremity byl použit i pro analýzu intenzity horkých vln v klimatických modelech a navíc podobný index může být také využit pro vyhodnocení míry sucha, vydatnosti deště, sněžení a jiných nebezpečných meteorologických jevů.
- Byl vytvořen seznam horkých a studených vln, které se vyskytly ve střední Evropě od roku 1950. Prostorová pole teplotních anomálií byla pro každou událost vykreslena do map a horké a studené vlny byly klasifikovány do čtyř skupin na základě svých charakteristik. Použitá metodika umožňuje aktualizovat tento seznam průběžně aktualizovat a tyto horké a studené vlny mohou být například použity jako analogy k simulovaným událostem v možném budoucím klimatu. Seznam horkých a studených vln může být dále rozšiřován například přidáním informací o způsobených škodách nebo příčinných faktorech jednotlivých událostí.
- Regionální klimatické modely řízené reanalýzou mají tendenci podceňovat intenzitu výjimečné horké vlny z roku 1994. Tyto chyby byly spjaty se simulací srážek, protože její největší podcenění souviselo s výrazným nadhodnocením srážkových úhrnů a naopak. Jelikož takto extrémní horké vlny jsou považovány za jedno z největších nebezpečí globální klimatické změny, nesprávná simulace podobných událostí je vážným nedostatkem současných klimatických modelů.
- Byly vytvořeny scénáře horkých vln pro střední Evropu pro možné budoucí klima. V blízké budoucnosti (2020–2049) je předpokládán počet horkých vln téměř dvakrát větší (15 horkých vln za desetiletí) v porovnání s historickým obdobím a tato hodnota je podobná pro všechny scénáře koncentrací skleníkových plynů. Na druhou stranu, simulovaná četnost horkých vln na konci 21. století (2–4 události za sezónu, 2070–2099) je závislá právě na zvoleném scénáři, takže snahy o mitigaci klimatické změny skrze snižování emisí skleníkových plynů by byly pravděpodobně účinné pouze v dlouhodobém horizontu. Nicméně je možné zavést vhodná adaptační opatření, například ta doporučená Evropskou platformou pro přizpůsobení se změně klimatu (<http://climate-adapt.eea.europa.eu>), která mohou částečně snížit dopady horkých vln v měnícím se klimatu.

Seznam literatury

- Abreu JA, Beer J, Steinhilber F, et al. (2008) For how long will the current grand maximum of solar activity persist? *Geophys Res Lett* 35:L20109. doi: 10.1029/2008GL035442
- Altenhoff AM, Martius O, Croci-Maspoli M, et al. (2008) Linkage of atmospheric blocks and synoptic-scale Rossby waves: a climatological analysis. *Tellus A* 60:1053–1063. doi: 10.1111/j.1600-0870.2008.00354.x
- Bastos A, Gouveia CM, Trigo RM, Running SW (2014) Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe. *Biogeosciences* 11:3421–3435. doi: 10.5194/bg-11-3421-2014
- Barnett AG, Hajat S, Gasparri A, Rocklöv J (2012) Cold and heat waves in the United States. *Environ Res* 112:218–224. doi: 10.1016/j.envres.2011.12.010
- Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, et al. (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science* (80-) 332:220–224. doi: 10.1126/science.1201224
- Barriopedro D, García-Herrera R (2006) A Climatology of Northern Hemisphere Blocking. *J Clim* 19:1042–1063.
- Barriopedro D, García-Herrera R, Huth R (2008) Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking. *J Geophys Res* 113:D14118. doi: 10.1029/2008JD009789
- Bednorz E (2011) Synoptic conditions of the occurrence of snow cover in central European lowlands. *Int J Climatol* 31:1108–1118. doi: 10.1002/joc.2130
- Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, et al. (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim Change* 81:71–95. doi: 10.1007/s10584-006-9226-z
- Buehler T, Raible CC, Stocker TF (2011) The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40. *Tellus A* 63:212–222. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00492.x
- Cattiaux J, Vautard R, Cassou C, et al. (2010) Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophys Res Lett* 37:L20704. doi: 10.1029/2010GL044613
- Cattiaux J, Yiou P, Vautard R (2012) Dynamics of future seasonal temperature trends and extremes in Europe: a multi-model analysis from CMIP3. *Clim Dyn* 38:1949–1964. doi: 10.1007/s00382-011-1211-1
- Della-Marta PM, Haylock MR, Luterbacher J, Wanner H (2007) Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *J Geophys Res* 112:D15103. doi: 10.1029/2007JD008510

- Fischer EM, Seneviratne SI, Lüthi D, Schär C (2007) Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys Res Lett* 34:L06707. doi: 10.1029/2006GL029068
- Francis JA, Vavrus SJ (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys Res Lett* 39:L06801. doi: 10.1029/2012GL051000
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, et al. (2008) A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J Geophys Res* 113:D20119. doi: 10.1029/2008JD010201
- Hurrell JW, Deser C (2010) North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *J Mar Syst* 79:231–244. doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.11.002
- Huth R, Kyselý J, Bochníček J, Hejda P (2008) Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe. *Ann Geophys* 26:1999–2004.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, et al. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Chang* 14:563–578. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2
- Konovalov IB, Beekmann M, Kuznetsova IN, et al. (2011) Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: Integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmos Chem Phys* 11:10031–10056. doi: 10.5194/acp-11-10031-2011
- Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Zeitschrift* 15:259–263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Kyselý J (2008) Influence of the persistence of circulation patterns on warm and cold temperature anomalies in Europe: Analysis over the 20th century. *Glob Planet Change* 62:147–163. doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.01.003
- Kyselý J (2010) Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect? *Int J Climatol* 109:89–109. doi: 10.1002/joc1874
- Plavcová E, Kyselý J (2012) Atmospheric circulation in regional climate models over Central Europe: links to surface air temperature and the influence of driving data. *Clim Dyn* 39:1681–1695. doi: 10.1007/s00382-011-1278-8
- Plavcová E, Kyselý J (2016) Overly persistent circulation in climate models contributes to overestimated frequency and duration of heat waves and cold spells. *Clim Dyn* 46:2805–2820. doi: 10.1007/s00382-015-2733-8
- Robine J-M, Cheung SLK, Le Roy S, et al. (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol* 331:171–178. doi: 10.1016/j.crv.2007.12.001

- Russo S, Sillmann J, Fischer EM (2015) Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ Res Lett* 10:124003. doi: 10.1088/1748-9326/10/12/124003
- Sanchez-Gomez E, Somot S, Déqué M (2009) Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Clim Dyn* 33:723–736. doi: 10.1007/s00382-008-0502-7
- Scaife AA, Knight J, Vallis G, Folland C (2005) A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophys Res Lett* 32:L18715. doi: 10.1029/2005GL023226
- Schneidereit A, Schubert S, Vargin P, et al. (2012) Large-Scale Flow and the Long-Lasting Blocking High over Russia: Summer 2010. *Mon Weather Rev* 140:2967–2981. doi: 10.1175/MWR-D-11-00249.1
- Schubert S, Wang H, Suarez M (2011) Warm Season Subseasonal Variability and Climate Extremes in the Northern Hemisphere: The Role of Stationary Rossby Waves. *J Clim* 24:4773–4792. doi: 10.1175/JCLI-D-10-05035.1
- Toth Z, Szentimrey T (1989) The binormal distribution: A distribution for representing asymmetrical but normal-like weather elements. *J Clim* 3:128–136.
- Toth Z, Szentimrey T (1989) The binormal distribution: A distribution for representing asymmetrical but normal-like weather elements. *J Clim* 3:128–136.
- Uppala SM, Kallberg PW, Simmons AJ, et al. (2005) The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc* 131:2961–3012. doi: 10.1256/qj.04.176
- van der Linden P, Mitchell JFB (2009) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter
- Vavrus S, Walsh JE, Chapman WL, Portis D (2006) The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *Int J Climatol* 26:1133–1147. doi: 10.1002/joc.1301
- Walsh J, Phillips A (2001) Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948-99. *J Clim* 14:2642–2658.
- Wijngaard JB, Klein Tank a. MG, Konnen GP (2003) Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int J Climatol* 23:679–692. doi: 10.1002/joc.906

Mgr. ONDŘEJ LHOTKA (* 1988)

e-mail: ondrej.lhotka@natur.cuni.cz

Vzdělání:

2012–současnost	PhD student oboru Fyzická geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze PhD projekt: Dlouhodobá proměnlivost horkých a studených vln ve střední Evropě
2010–2012	Magisterský titul v oboru Fyzická geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze
2007-2010	Bakalářský titul v oboru Geografie a kartografie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze

Řešitel studentských projektů:

- Scénáře změn charakteristik horkých vln ve střední Evropě – rozsah a neurčitosti (Grantová agentura Univerzity Karlovy, projekt číslo 250215, 2015-2016)
- Index extremity horkých a studených vln ve střední Evropě (Grantová agentura Univerzity Karlovy, projekt číslo 532313, 2013-2014)

Odborné kurzy:

- Kurz psaní výzkumných projektů pořádaný Centrem výzkumu globální změny (2015)
- Kurz základů vědecké práce pořádaný Akademií věd České republiky (2013)

Pracovní zkušenosti:

2014–současnost	PhD student, Ústav výzkumu globální změny AV ČR
2012–současnost	PhD student, Ústav fyziky atmosféry AV ČR

Účast na projektech:

Prostorové a časové charakteristiky horkých a studených vln v simulacích klimatických modelů (Grantová agentura České republiky, projekt číslo 16-22000S, 2016-2018; Hlavní řešitel: J. Kyselý)

Reprodukce vztahů mezi atmosférickou cirkulací a rozděleními přízemní teploty vzduchu a srážek v klimatických modelech (Grantová agentura České republiky, projekt číslo P209/10/2265, 2010-2014; Hlavní řešitel: J. Kyselý)

Počítačové dovednosti:

Geoinformatika (GIS) a kartografie – ArcGIS, Surfer, MapInfo, OCAD

Dálkový průzkum Země – PCI Geomatica

Statistický software – cran R

MS Windows, MS Office – Excel, Word, Power Point

Cizí jazyky:

Angličtina: vyšší-pokročilý - B2, certifikát FCE

Francouzština: začátečník

Němčina: začátečník

Články v časopisech s impakt faktorem:

Lhotka, O., Kyselý, J. (2015) Hot Central-European summer of 2013 in a long-term context. *Int. J. Climatol.* 35, 4399-4407. DOI: 10.1002/joc.4277

Lhotka, O., Kyselý, J. (2015) Spatial and temporal characteristics of heat waves over Central Europe in an ensemble of regional climate model simulations. *Clim. Dynam.* 45, 2351-2366. DOI: 10.1007/s00382-015-2475-7

Lhotka, O., Kyselý, J. (2015) Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe. *Int. J. Climatol.* 35, 1232-1244. DOI: 10.1002/joc.4050

Rusticucci, M., Kyselý, J., Almeida, G., Lhotka, O. (2016) Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theor Appl Climatol* 124, 679-689. DOI: 10.1007/s00704-015-1445-7

Články v konferenčních sbornících:

Lhotka, O., Kyselý, J., Farda, A. (2015) Heat waves over Central Europe in ALADIN-Climate/CZ regional climate model: evaluation and future projections. In: *Global Change: A Complex Challenge : Conference Proceedings*. Brno, Global Change Research Centre CAS, p. 14-17, ISBN 978-80-87902-10-3.

Lhotka, O., Kyselý, J. (2014) Atmospheric circulation and precipitation in regional climate models during major heat waves in Central Europe. In: *3rd International Lund Regional-Scale Climate Modelling Workshop: 21st Century Challenges in Regional Climate Modelling - Workshop Proceedings*. Lund, International Baltic Earth Secretariat Publications, p. 240-241, ISSN 2198-4247.

Lhotka, O., Kyselý, J. (2013) Analysis of temporal variability and spatial characteristics of heat waves in central Europe using extremity index. In: *Global Change and Resilience: From Impacts to Responses: Proceedings of the 3rd annual Global Change and Resilience Conference*. Brno, Global Change Research Centre AS CR, p. 105-109, ISBN 978-80-904351-8-6.