

# Vlažni vročinski valovi

Ana Šubic

Mentor: viš. pred. dr. Žiga Zaplotnik

Seminar, 3. letnik

Oddelek za fiziko, FMF, UL, 2022/2023

## Povzetek

Vlažni vročinski valovi pri ekstremnih vrednostih temperature mokrega termometra ( $T_m$ ) neposredno ogrožajo človekovo življenje. Temperatura mokrega termometra je količina, ki jo izmerimo s posebnim termometrom, in je odvisna tako od temperature suhega zraka kot tudi od njegove relativne vlažnosti. Višina  $T_m$  je pri opisovanju vročinskih valov pomemben podatek, ker ljudje vročino pri visoko vlažnem zraku težje prenašamo kot pri suhem. Limita človeške tolerance pri popolnih pogojih je  $35\text{ }^\circ\text{C}$ , neugoden efekt na psihofizično počutje pa imajo že dosti nižje temperature  $T_m$ . V seminarju se posvetimo vplivom vlažne vročine na človeško produktivnost in zdravje. Obravnavamo vzroke za nastanek vlažnih vročinskih valov ter dodatne dejavnike, kot so temperatura morske gladine, El Niño in monsuni. Pojavljanje ekstremnih valov v bližnji preteklosti preučimo statistično, obravnavamo pa tudi konkretne dogodke ter trende v prihodnosti. Na vlažne vročinske valove vplivajo tudi podnebne spremembe, saj se je frekvenca pojavljanja ekstremnih  $T_m$  najmanj podvojila napram predindustrijski dobi. Raziščemo, kakšne bi morale biti meje zvišanja povprečne letne temperature, da se vrednosti  $T_m$  ohranijo v mejah človeške naseljivosti, ter preverimo morebitne napake pri njihovem modeliranju zaradi omejene resolucije rekonstrukcij preteklega vremena in klimatskih modelov.

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Definicija temperature mokrega termometra</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Vlažni vročinski valovi in njihov vpliv na človeka</b>	<b>3</b>
3.1	Vpliv vlažne vročine na produktivnost . . . . .	4
3.2	Vlažni vročinski valovi in smrtnost . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Najbolj obremenjena območja</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Dejavniki za nastanek vlažnih vročinskih valov</b>	<b>6</b>
5.1	Vpliv morja in njegove temperature . . . . .	6
5.2	Vpliv monsuna na Južno Azijo . . . . .	6
5.3	Vpliv južne oscilacije El Niño . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Vlažni vročinski valovi in podnebne spremembe</b>	<b>7</b>
6.1	Trendi v bližnji preteklosti . . . . .	7
6.2	Povezava s podnebnimi spremembami in napovedi za prihodnost . . . . .	8
6.3	Ciljne vrednosti za prihodnost . . . . .	9
6.4	Negotovosti in podcenjevanje ekstremnih vrednosti . . . . .	10
6.5	Negotovosti na slovenskem območju . . . . .	10
<b>7</b>	<b>Zaključek</b>	<b>12</b>
<b>8</b>	<b>Literatura</b>	<b>13</b>

# 1 Uvod

Ko obravnavamo meteorološke količine, je pomembnost beleženja temperature ozračja ter spremljanje trendov globalnega segrevanja očitna. Vsako zvišanje povprečne letne temperature povzroči daljnosežne posledice, tudi neposredno na naše zdravje. Vpliv vročine na psihofizično počutje človeka se lahko kvantitativno ocenimo prek temperature mokrega termometra - to je najnižje temperature, ki jo v vlažno krpo ovit termometer lahko doseže zgolj prek oddajanja toplote izhlapevajoči vodi. Temperatura mokrega termometra je odvisna od temperature in relativne vlažnosti zraka. Ker je, v kolikor se je potrebno ohlajati, potenje naš glavni način za vzdrževanje stalne telesne temperature, je temperatura mokrega termometra pri zdravih ljudeh neposreden pokazatelj limite človeške tolerance; da lahko jedro telesa ohlajamo na potrebnih  $36.8^{\circ}\text{C}$ , temperatura mokrega termometra ne sme preseči  $35^{\circ}\text{C}$ .

V seminarju najprej spoznamo izpeljavo temperature mokrega termometra (angl. 'wet bulb temperature' - WBT, v nadaljevanju bomo uporabili  $T_m$ ) ter opišemo, kakšna zdravstvena tveganja prinašajo vlažni vročinski valovi. Sledi pregled najbolj obremenjenih območij in njihovih geografskih značilnosti. Zanima nas, kakšna je bila pogostost vlažnih vročinskih valov s  $T_m$  nad  $35^{\circ}\text{C}$  v preteklosti, njihova korelacija s podnebnimi spremembami in predikcije pojavljanj v prihodnosti. Preverimo zanesljivost metodologije in velikost napake, če primerjamo izmerjene temperature z njihovimi rekonstrukcijami preteklega vremena (v meteorologiji se takšnim z meritvami podprtim rekonstrukcijam pravi reanalize). Zavedanje, da modeli za napovedovanja vremena in klime zaradi omejitev resolucije pogosto podcenjujejo ekstremne vrednosti na majhnih območjih ali kratkih intervalih -ter stalno popravljanje takšnih napak-, je pri napovedovanju ekstremnih dogodkov ključnega pomena. Preverimo še predikcije in velikost njihovih negotovosti.

## 2 Definicija temperature mokrega termometra

Da lahko vlažne vročinske valove in meje človeške tolerance obravnavamo na konkretni fizikalni osnovi, je potrebno razumeti povezavo med temperaturo zraka, temperaturo mokrega termometra in relativno vlažnostjo. S tem namenom v nadaljevanju predstavimo način izračuna relativne vlažnosti v primeru, da temperaturo mokrega termometra že direktno izmerimo na merilni postaji.

Temperaturo mokrega termometra izmerimo prek termometra, ovitega v tkanino, ki mora biti stalno navlažena z destilirano vodo. Voda, ki ob tem izhlapeva, porablja notranjo energijo kapljevine v bučki termometra in okoliškega zraka, ta se zato ohlaja in mokri termometer izmeri nižjo temperaturo od običajnega. Da se izognemo nasičenim pogojem okrog termometra, mora biti poskrbljeno za zadostno prezračevanje. Okoliški zrak se mora premikati z dovolj veliko hitrostjo, da se toplota v največjem možnem deležu izgublja s konvekcijo in ne prek prevajanja ali sevanja - s tem namenom imamo termometer v tulcu, ki ga prezračujemo s hitrostjo od 2,5 do 10 m/s.

Izpeljavo začnemo z energijsko bilanco - izhlapela voda je za fazni prehod potrebovala energijo, ki jo je pridobila iz okoliškega zraka, ki se je zato ohladil. Toplota, porabljena za fazni prehod, je na desni strani enačbe zapisana v več členih, saj sestoji iz suhega zraka

(prvi člen) in vodne pare, ki imata različni specifični toploti (drugi in tretji člen). Velja

$$-L(m_{\text{nas}} - m_v) = m_s c_{ps}(T_m - T) + m_{\text{nas}} c_{pv} T_m - m_v c_{pv} T, \quad (1)$$

kjer je  $c_{pv}$  specifična toplota vodne pare pri stalnem tlaku in  $c_{ps}$  specifična toplota vodnega suhega zraka pri stalnem tlaku.  $L$  označuje latentno toploto za fazni prehod med vodo in paro, ki je sicer odvisna od temperature in pri 30 °C npr. znaša 2429.8 kJ/kg.  $m_s$  je masa suhega zraka,  $m_{\text{nas}}$  masa vodne pare v tulcu okrog mokrega termometra, ko je zrak nasičen z njo,  $m_v$  pa maso vodne pare, ki je bila v zraku (tudi v zraku tulca) prisotna že sama po sebi. Razlika med  $m_{\text{nas}}$  in  $m_v$  torej označuje maso iz krpe izhlapele vode (torej maso vode, ki za fazni prehod porablja toploto),  $T$  je temperatura okoliškega zraka in  $T_m$  temperatura mokrega termometra (v Kelvinih). Prvi člen na desni strani enačbe opisuje ohladitev suhega zraka, drugi del pa vso energijo, ki jo v sistem odda ohlajevanje vodne pare, pri čemer je upošteevano, da je na koncu v zraku več vlage kot na začetku.

Enačbo delimo z maso suhega zraka in uvedemo razmerje mešanosti  $r = m_v/m_s$  in nasičeno razmerje mešanosti  $r_{\text{nas}} = m_{\text{nas}}/m_s$ :

$$-L(r_{\text{nas}} - r) = c_{ps}(T_m - T) + r_{\text{nas}} c_{pv} T_m - r c_{pv} T. \quad (2)$$

Če torej na postaji izmerimo  $T$  in  $T_m$ , lahko relativno vlažnost dobimo prek razmerja mešanosti, ki ga izrazimo iz zgornje enačbe kot

$$r = \frac{c_{ps}(T_m - T) + r_{\text{nas}} c_{pv} T_m + r_{\text{nas}} L}{c_{pv} T + L}. \quad (3)$$

Relativna vlažnost je definirana kot  $f = e/e_{\text{nas}}(T)$ , kjer  $e$  predstavlja parni tlak,  $e_{\text{nas}}(T)$  pa nasičen parni tlak pri temperaturi  $T$ . Z razmerjem mešanosti pse povezuje kot

$$e = \frac{r R_v p}{R + r R_v}. \quad (4)$$

V enačbi 3 manjka samo še nasičeno razmerje mešanosti  $r_{\text{nas}}$ . Dobimo ga iz povezave med razmerjem mešanosti in parnim tlakom (enačba 5), kjer ne pozabimo, da je zrak lokalno nasičen pri nižani temperaturi  $T_m$ . Dobimo torej

$$r_{\text{nas}} = \frac{e_{\text{nas}}(T_m)}{p - e_{\text{nas}}(T_m)} \frac{R}{R_v}, \quad (5)$$

kjer nasičen parni tlak pri izmerjeni  $T_m$  dobimo prek

$$e_{\text{nas}}(T_m) = e_{\text{nas}0} \cdot \exp\left[-\frac{h_i}{R_v} \left(\frac{1}{T_{s0}} - \frac{1}{T_m}\right)\right], \quad (6)$$

torej Clausius-Clapeyronove enačbe [1]. V enačbi sta  $e_{s0} = 6.1$  hPa in  $T_{s0} = 273$  K tlak in temperatura trojne točke vode in  $L$  že omenjena specifična izparilna toplota vode.  $R_v$  je specifična plinska konstanta za vodno paro, torej splošna plinska konstanta  $R$ , deljena z molsko maso vode, in znaša 461 J/kgK. [2].

### 3 Vlažni vročinski valovi in njihov vpliv na človeka

Po definiciji Svetovne meteorološke organizacije se vlažni vročinski val zgodi, ko temperatura zraka doseže ali preseže  $30\text{ }^\circ\text{C}$  in relativna vlažnost doseže ali preseže  $50\%$  vsaj dva zaporedna dneva. Zaradi visoke vlažnosti zraka se poveča tudi  $T_m$ , ki pri teh pogojih znaša  $22.3\text{ }^\circ\text{C}$ .

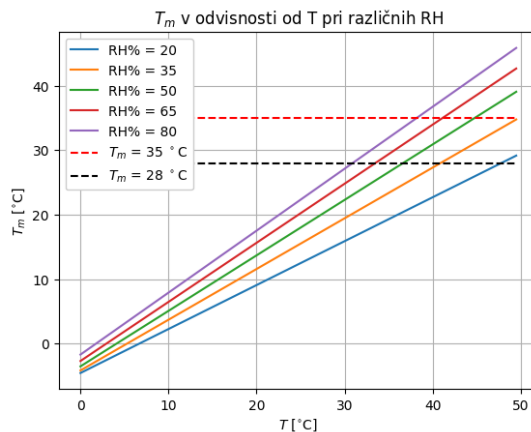
Kot je že nakazano v uvodu, je pri visokih temperaturah zraka za ljudi potenje glavni način za vzdrževanje stalne telesne temperature. Analogija z izgubljanjem toplote mokrega termometra je najboljša, ko veljajo popolni pogoji: oseba, ki se ohlaja, je dobro hidrirana (torej je zaloga vode za izhlapevanje zadostna), v senčnem in prezračevanem prostoru (torej ne prejme direktnega sončnega sevanja), minimalno prekrita z oblačili in v popolnem mirovanju (torej telo ne generira še dodatne toplote). Prav tako je oseba zdrava, odrasla in brez prekomerne telesne teže [3]. Takšna oseba mora za primeren toplotni tok iz telesnega jedra navzven vzdrževati ustrezen temperaturni gradient med jedrom in površino telesa, torej mora površino telesa ohranjati na približno  $35\text{ }^\circ\text{C}$ , zato je teoretična limita človeškega preživetja pri  $T_m = 35\text{ }^\circ\text{C}$ . Praktična limita človeške tolerance je še nekaj stopinj nižje. Prav tako so že dosti nižje temperature ( $T_m = 28\text{ }^\circ\text{C}$ ) razlog za povišanje smrtnosti in poslabšanje kroničnih bolezni [3]. Če iz enačbe 3 izpostavimo  $T_m$ , vidimo, kako se viša skladno z relativno vlažnostjo oz. z razmerjem mešanosti  $r$ :

$$T_m = \frac{r(c_{pv}T + L) + c_{ps}T - r_{nas}L}{c_{ps} + r_{nas}c_{pv}}. \quad (7)$$

Tudi v praksi imamo pogosto podana podatka o temperaturi in relativni vlažnosti,  $T_m$  pa moramo šele poračunati. V tem primeru se dobro obnese tudi empirična formula za izračun  $T_m$  Ronalda Stulla [4]:

$$\begin{aligned} T_m = T \arctan[0,151977(\text{RH}\% + 8,313659)^{1/2}] \\ + \arctan(T + \text{RH}\%) - \arctan(\text{RH}\% - 1,676331) \\ + 0,00391838(\text{RH}\%)^{3/2}\arctan(0,023101\text{RH}\%) - 4,686035, \end{aligned} \quad (8)$$

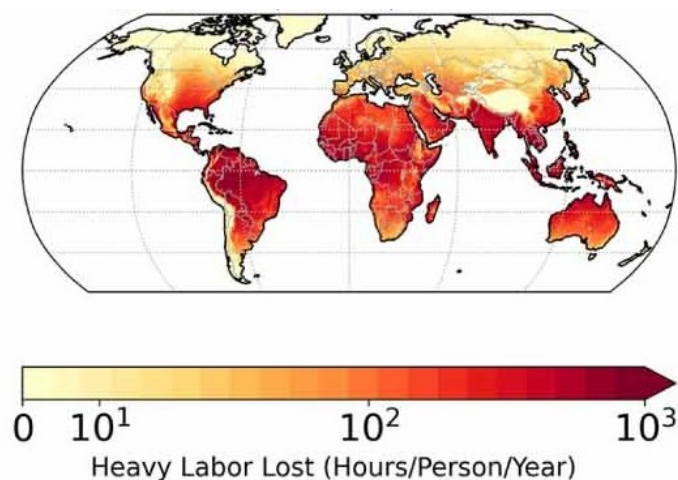
kamor temperaturo  $T$  vnašamo v stopinjah Celzija, relativno vlažnost  $\text{RH}\%$  pa v odstotkih. Na sliki 1 je očitno, koliko lažje je prenašati suho vročino v primerjavi z vlažno:



Slika 1: Temperature mokrega termometra pri različnih temperaturah zraka in relativnih vlažnostih, izračunane po empirični formuli.  $T_m = 28\text{ }^\circ\text{C}$  in  $T_m = 35\text{ }^\circ\text{C}$  sta kot dve kritični vrednosti za boljše preglednost še posebej označeni.

### 3.1 Vpliv vlažne vročine na produktivnost

Zaradi vlažne vročine po nekaterih raziskavah[5] na svetu izgubimo do 650 milijard ur dela letno. To je primerljivo z izgubami, ki jih je povzročila pandemija COVID-19, in v več državah prekorači 10% bruto domačega proizvoda. Najbolj so na udaru težka fizična dela na prostem, na primer gradnja, gozdarjenje, kmetovanje, ribištvo in rudarjenje. V zadnjih štirih desetletjih so se globalne izgube dela zaradi vročine povečale za najmanj 9% na prebivalca, kar pomeni, da imajo lahko že razmeroma majhna zvišanja povprečne temperature ( $\Delta T < 0.5^\circ\text{C}$ ) velik vpliv na gospodarstvo[5]. Učinki so tako veliki, ker so območja z vlažno vročino (monsunska območja Azije, obalni predeli) v subtropskem pasu gosto poseljena, in prav v teh državah v razvoju se s težkim fizičnim delom še vedno ukvarja velik del prebivalstva - porazdelitev izgub na prebivalca po svetu je prikazana na sliki 2.



Slika 2: Zemljevid izgub delovnih ur na prebivalca zaradi vlažne vročine. Prirejeno po [5].

### 3.2 Vlažni vročinski valovi in smrtnost

Nadaljujmo z vplivom vročinskih valov na zdravje. Ocene se med sabo razlikujejo, vendar lahko z gotovostjo trdimo, da je vročinski val v Evropi leta 2003 povzročil vsaj 30 tisoč, po nekaterih ocenah pa tudi do 70 tisoč smrtnih žrtev [6]. Največji delež teh je bilo v Franciji, kjer so bile temperature površja ponekod tudi do  $10^\circ\text{C}$  višje od klimatološkega povprečja za julij in avgust. Temu je sledil vlažen vročinski val v zahodni Rusiji leta 2010, ko je po ocenah umrlo 55 tisoč ljudi [7]. Pomembno se je zavedati, da pri obeh katastrofah temperatura mokrega termometra sploh ni presegala  $28^\circ\text{C}$  [3].

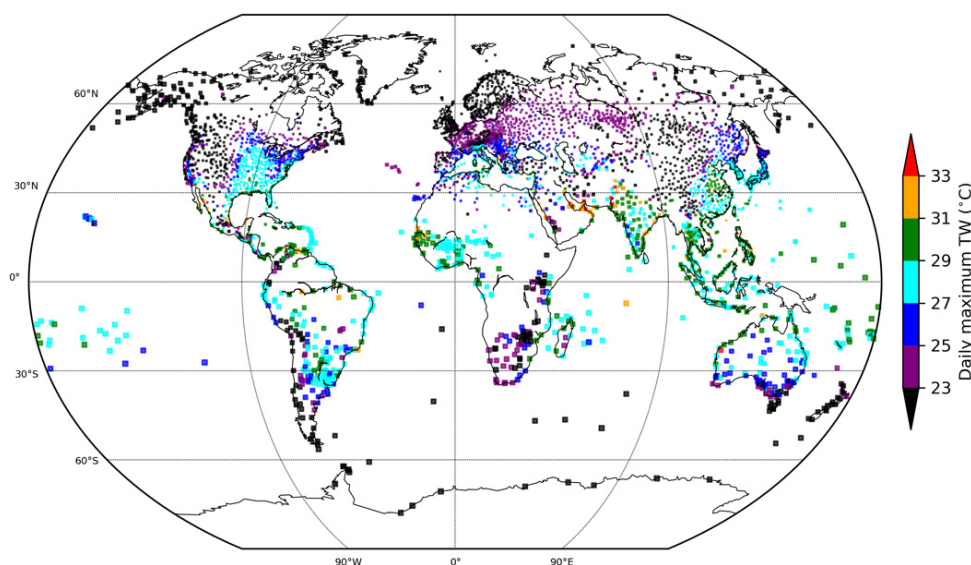
Ob omenjenih dveh vročinskih valovih se je izkazalo, da so najbolj ogroženi starejši ljudje, ki še lahko živijo sami. Zaradi starosti je njihova termoregulacija poslabšana, brez pomoči pa ob vročini pogosto ne zmorejo ustrezno ukrepati. Že nekaj ur hude vročine je dovolj za vročinski udar, nevarno stopnjo dehidracije in poslabšanje že prej prisotnih kroničnih stanj, npr. bolezni dihal ali srca in ožilja, gastrointestinalne in urološke bolezni [8]. Ogroženi so tudi majhni otroci, ki termoregulacije še nimajo tako razvite kot odrasli, hkrati pa so fizično precej aktivni. Stopnja tveganja je odvisna tudi od socialnoekonomskega statusa.

## 4 Najbolj obremenjena območja

Za po deset tisoče smrtnih žrtev je bila dovolj že  $T_m = 28\text{ }^\circ\text{C}$ , vendar celinska Rusija ali južna Francija niti ne spadata med najbolj obremenjena območja. Največja tveganja za smrtonosne vročinske valove se pojavljajo na obalnih predelih v subtropskem pasu. Šibki obalni vetrovi (angl. 'sea breeze') nad obalo hitro prinesejo veliko vlage, kar je najpomembnejše za visoko  $T_m$ . Izjema so območja jugovzhodne Azije, kjer monsoni prinesejo veliko količino vlage tudi globlje v celino.

Pomembna je torej kombinacija vlažnih morskih zračnih mas in neprekinjene visoke vročine tako na kopnem kot na morski gladini. Temperature mokrega termometra nad  $31\text{ }^\circ\text{C}$  so bile izmerjene ob Perzijskem zalivu in Rdečem morju, vzhodni in severozahodni obali Indije, Pakistanu, v Kalifornijskem zalivu in južno v Mehiškem zalivu. Za Perzijski zaliv je bilo potrjeno, da je  $T_m$  za kratko obdobje in na omejenem območju že preseгла  $35\text{ }^\circ\text{C}$ , vendar ne za dovolj dolgo, da bi vplivala na vrednosti v rekonstrukcijah vremena ali klimatskih modelih (več o tem v poglavju 6.4). Slika 3 prikazuje, kolikšna je bila najvišja izmerjena  $T_m$  v letih med 1979 in 2017 na merilnih postajah, ki so imele izmerke za vsaj 50% časovnega intervala.

Ob tem se pojavi vprašanje, zakaj vrednosti niso enako problematične v tropskem pasu. Odgovor je najverjetneje v večji nestabilnosti tropske atmosfere in posledično nižjih temperaturnih maksimumih, večjem evapotranspiracijskem<sup>1</sup> potencialu in večji pokritosti neba z oblaki. Zračne mase nad tropi so torej manj stabilne, močno sončno sevanje pa prekinjajo konveksijske padavine [3].



Slika 3: Zemljevid ekstremnih vrednosti  $T_m$  za časovno obdobje med 1979 in 2017 po meritvah HadISD. Vzeto iz [3].

<sup>1</sup>Evaporacijski potencial je opredeljen kot količina vode, ki bi lahko izhlapela, če bi bila na voljo. Je funkcija temperature površja in zraka, osončenosti in vetra, ki vplivajo na koncentracijo vodne pare neposredno nad izparilno površino [9].

## 5 Dejavniki za nastanek vlažnih vročinskih valov

### 5.1 Vpliv morja in njegove temperature

Morje je glavni vir vlage v zraku, zato vrednosti  $T_m$  daleč v notranjosti celine navadno niso primerljive z obalnimi ekstremi. Pomemben dejavnik pri izhlapevanju je temperatura morske gladine, zato so najbolj obremenjena območja zalivi s plitkim morjem in omejeno vertikalno cirkulacijo vode; na ta način morje ne more v nedogled absorbirati toplote iz ozračja, zato se tudi samo hitro ogreje. Zaradi zakona o temperaturnem ravnovesju dotikajočih se sistemov bi moral imeti tudi z vlago nasičen zrak nad morsk gladino s temperaturo  $SST = 35\text{ }^\circ\text{C}$  (angl. sea surface temperature) enako temperaturo mokrega termometra, torej  $T_m = 35\text{ }^\circ\text{C}$ . V praksi zračne mase tega ravnovesja ne bodo dosegle, ker se zaradi konvekcije nad morsk gladino zadržijo le kratek čas. SST Perzijskega zaliva je potrjeno presegla  $35\text{ }^\circ\text{C}$  vsako leto od 1979 naprej, v poletju 2017 pa jo je presegala kar 33% časa. Pokazala se je očitna korelacija med pojavnostjo vlažnih vročinskih valov in viški temperature gladine Perzijskega morja [3].

### 5.2 Vpliv monsuna na Južno Azijo

V Južni Aziji se čas največjih vrednosti  $T_m$  spreminja z napredovanjem poletnega monsuna. Če območje razdelimo na regiji 'zgodnjega' (povprečni datum začetka monsunov pred 15. junijem) in 'poznega' monsuna (povprečni datum začetka monsunov po 15. juniju), se pokaže, da je največ ekstremov  $T_m$  okrog lokalnega datuma za začetek monsuna. Čeprav so enakovredne skrajne vrednosti  $T_m$  možne tudi pred, med in po monsunskih deževjih, imajo drugačne lastnosti; tekom poletja postajajo bolj vlažne in imajo nižje suhe temperature (vrednost  $T_m$  je torej lahko enako visoka, ampak čedalje bolj zaradi povišane vlažnosti in manj zaradi visoke temperature ozračja, ki bi narekovala potrebo po ohlajanju). Po vsem svetu se take spremembe temperature in vlažnosti pri enaki  $T_m$  pojavljajo v dobro določenem bivariatnem prostoru. Dejstvo, da so te spremembe sistematično povezane s poletnim monsunom v Južni Aziji, poudarja pomembnost razumevanja dogajanja tudi na podsezonski časovni skali, če želimo dobro napovedati ekstremne vrednosti.

### 5.3 Vpliv južne oscilacije El Niño

Cikli ENSO (El Niño-Southern Oscillation) so periodična nihanja v temperaturi morske vode in zračnem tlaku vzdolž ekvatorja v Tihem oceanu, kjer morski tokovi vplivajo na oceansko atmosfero. Glavni dejavnik, ki vodi do pojava ENSO, je sprememba smeri in jakosti vetrov, ki pihajo prek Pacifika, ter s tem povezana sprememba v smeri in moči morskih tokov v tem oceanu. Cikli ENSO se pojavljajo na približno dve do sedem let, in se delijo na tri faze: normalno, El Niño in La Niña, kjer so razmere podobne običajnim, vendar še bolj stabilne. V normalni fazi je temperatura morske vode v vzhodnem Tihem oceanu nižja kot v zahodnem, kar povzroča stabilen zračni tlak in običajne vremenske vzorce. V fazi El Niño se temperatura morske vode v vzhodnem Tihem oceanu dvigne za vsaj  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ , kar vpliva na zračni tlak in povzroča spremembe v vremenu po vsem svetu - pa tudi direktno vpliva na količino vlage v zraku, saj je je nad toplejšim vzhodnim Pacifikom tako več.



Raziskave, ki so primerjale leta močnih ENSO s pojavnostjo visokih vrednosti  $T_m$ , so potrdile korelacijo med obojima. Na območju Indije in Kitajske El Niño poveča tako frekvenco kot tudi trajanje in intenzivnost vročinskih valov, medtem ko La Niña deluje ravno obratno [10]. Za vlažne vročinske valove velja, da so se časa El Niña leta 1998 in 2016 tako v tropih kot v subtropih visoke temperature mokrega termometra pogosteje pojavljale, vendar predvsem tiste v še običajnih vrednostih ( $T_m = 27^\circ\text{C} - 29^\circ\text{C}$ ). Korelacija El Niña in ekstremno visokih vrednosti ni tako močna. Učinek oscilacije je v tropskem pasu očitnejši kot v subtropskem [3].

## 6 Vlažni vročinski valovi in podnebne spremembe

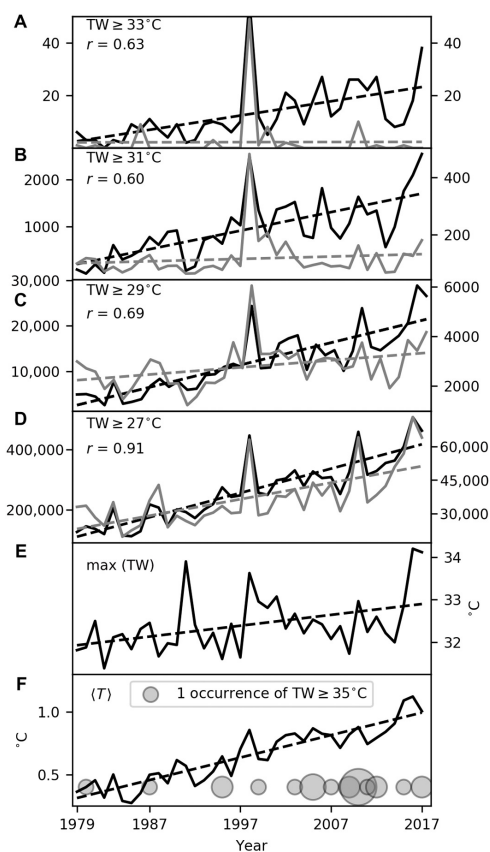
### 6.1 Trendi v bližnji preteklosti

Meritve temperature mokrega termometra s postaj dokazujejo več globalnih prekoračitev  $31^\circ\text{C}$  in  $33^\circ\text{C}$ , dve postaji pa sta že poročali o več najvišjih dnevniških vrednostih  $T_m$  nad  $35^\circ\text{C}$ . Takšne vrednosti večinoma trajajo le eno do dve uri [3]. Pojavljanje visokih vrednosti (nad  $27^\circ\text{C}$ ,  $29^\circ\text{C}$ ,  $31^\circ\text{C}$  in  $33^\circ\text{C}$ ) se je med leti 1979 in 2017 vsaj podvojilo - porast je torej močen in nedvomen. Na sliki 4 je razvidno, kolikokrat letno smo presegli določeno tvegano  $T_m$  glede na meritve in glede na reanalize <sup>2</sup>.

Opazimo lahko, da tako meritve (podatki iz HadISD, polna črna črta na sliki 4 A-D) kot reanalize ERA-Interim (polna siva črta) kažejo naraščajoč trend, vendar slednja ne vključuje toliko ekstremnih vrednosti kot meritve. To je smiselno, saj ima ERA-Interim omejeno prostorsko in časovno ločljivost: podatki so rekonstruirani za mrežo s celico  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  in s šesturno frekvenco [11]. Ekstremi, ki so nastopili za kratek čas ali prostorsko izven točk mreže, na točkah in časih rekonstrukcije ne bodo opisali dejanske maksimalne (ali v splošnem ekstremne)  $T_m$ . ERA5, novejša reanaliza ECMWF, bi se verjetno že bolje odrezala, saj podatke opisuje z večjo prostorsko in časovno ločljivostjo.

---

<sup>2</sup>Reanalize v meteorologiji so velike baze rekonstruiranih podatkov o vremenu za več desetletij nazaj. Meteorološke spremenljivke so navedene npr. za vsako uro v dnevu in razporejene po geografski mreži z določeno ločljivostjo; tako lahko vremenu na vsaki mrežni točki sledimo daleč v preteklost, tudi če nimamo vseh meritev. Dobijo se s pomočjo združevanja meritev v modele za napovedovanje vremena in modeliranja vremenskega sistema.



Slika 4: Porast  $T_m$  - grafi (A), (B), (C), (D): črna polna črta prikazuje število presežkov določene temperature  $T_m$ , na grafu označene s  $TW$  med letoma 1979 in 2017 po meritvah iz baze HadISD (meteorološki podatki te baze so preverjene kakovosti), siva pa presežke po reanalizi ERA Interim. Oba trenda sta izrisana s črtkanima črtama. (E) prikazuje najvišjo letno  $T_m$  v reanalizi. Neprekinjena linija v (F) prikazuje anomalijo letnega temperaturnega povprečja v primerjavi s predindustrijsko dobo, sivi krogi pa, glede na velikost, število pojavov  $T_m > 35^\circ\text{C}$  tisto leto. Vzeto iz [3].

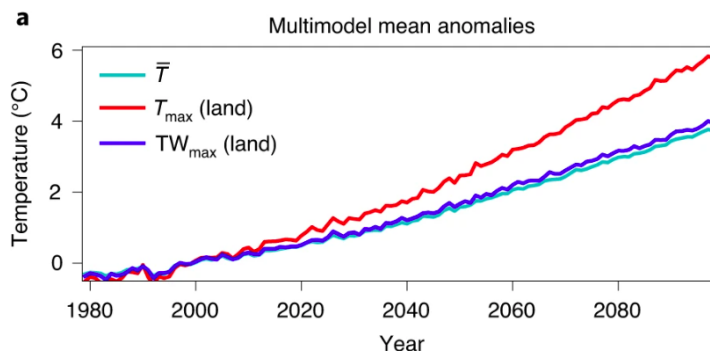
## 6.2 Povezava s podnebnimi spremembami in napovedi za prihodnost

Glede na to, da je intenzivnost vlažnih vročinskih valov odvisna od vročine in vlage, povprečna temperatura ozračja in oceanskega površja pa v zadnjem stoletju naraščata, so tudi vse pogostejši ekstremni valovi kvantitativno povezani s trendi globalnega segrevanja. Razumevanje te povezave je pomembno raziskovalno vprašanje, ki omogoča boljše poznavanje frekvence in intenzivnosti ekstremnih dogodkov v prihodnosti ter s tem tudi možnost za pripravo in omejitev smrtnih žrtev.

Poglejmo si, za koliko bodo narasle temperature mokrega termometra v prihodnosti pri različnih emisijskih scenarijih RCP<sup>3</sup>. Simulacije z modeloma GFDL-CM3 in IPSL-CM5A-

<sup>3</sup>Reprezentativna pot koncentracije (angl. Representative Concentration Pathway, skr. RCP), označuje splošno sprejete scenarije trajektorij koncentracij toplogrednih plinov v prihodnosti, pri čemer se scenariji vrstijo od optimalnega (1.9) do najbolj pesimističnega (8.5), kjer vrednost pomeni efektivni sevalni pribitek zaradi povečane koncentracije toplogrednih plinov v  $\text{W}/\text{m}^2$ . Scenarij 1.9 obravnava omejitev dviga povprečne temperature na  $1.5^\circ\text{C}$ , kar je bilo kot optimalni izid in motivacija določeno tudi pri Pariškem sporazumu. Scenarij 8.5 ne predvideva regulacij količine emisij, ampak kvečjemu njihov nadaljni porast vse do leta 2100. Med tema dvema se zvrstijo še drugi, bolj realistični scenariji [12].

LR<sup>4</sup> so pokazale, da bi po RCP 8.5 ob zvišanju povprečne temperature v tropih za 1 °C za vsak kraj posebej pomenilo zvišanje maksimalne temperature (suhega termometra) od 1 °C do 2.3 °C. Po drugi strani je zvišanje maksimalne temperature mokrega termometra bolj homogeno: za vsako stopinjo povprečne temperature v tropih se maksimalna  $T_m$  zviša za 0.8 °C do 1.3 °C [14]. Porast obeh temperatur po scenariju 8.5 je prikazan na sliki 5.



Slika 5: Porast  $T$  in  $T_m$  po RCP 8.5, kombinirana modela GFDL-CM3 in IPSL-CM5A-LR.  $T_{\max}$  označuje najvišje vrednosti temperature zraka  $T$ ,  $TW_{\max}$  ekstreme temperature mokrega termometra  $T_m$ ,  $\bar{T}$  pa povprečno temperaturo zraka. Vzeto iz [14].

### 6.3 Ciljne vrednosti za prihodnost

Da se ekstremne temperature mokrega termometra ob višanju povprečnih tropskih temperatur ne višajo tako sunkovito kot ekstremne temperature suhega, je za nas ugodno. Vseeno pa so, kot že prikazano, temperature mokrega termometra že nekajkrat presegle 35 °C - samo za prekratek čas, da bi reanalize to pokazale. Kako torej take dogodke v prihodnosti čim bolj omejiti?

Raziskava iz leta 2020[3] obravnava, za največ koliko se sme povečati povprečna letna temperatura na ogroženih območjih, da  $T_m = 35$  °C na nobeni izmed točk v mreži reanalize ne bi nastopila več kot enkrat na 30 let. Ugotavljali so tudi, kolikšno zvišanje temperature od časa predindustrijske dobe bi bilo potrebno na vsaki izmed točk, da bi presegli  $T_m = 35$  °C. Obravnaval se je Perzijski zaliv, saj so se doslej vsi vlažni vročinski valovi nad mejo človeške tolerance pojavili tam.

Znanstveniki so uporabili reanalizo ERA-Interim in na točke Perzijskega zaliva prilagajali model GEV<sup>5</sup>. Dobljena Temperature of Emergence (ToE) pove, da do fatalne  $T_m$  nad morjem Perzijskega zaliva manjka samo 1.3 °C (90% interval zaupanja z vrednostmi od 0.81 do 1.73 °C). Rezultat se sklada s trendi višanja temperature morske gladine, za katero smo v poglavju 5.1 obravnavali, kako se povezuje s  $T_m$ . ToE za bližnja območja na kopnem znaša 2.3 °C (interval od 1,4 do 3.3 °C) [3]. Nadalje je neka druga raziskava dobila

<sup>4</sup>GFDL-CM3 in IPSL-CM5A-LR sta podnebna modela, ki se uporabljata za simulacijo in napovedovanje prihodnjih podnebnih sprememb. GFDL-CM3 je povezan model splošne cirkulacije ozračja in oceanov, ki sta ga razvili Nacionalna uprava za oceane in ozračje (NOAA) in Univerza Princeton. IPSL-CM5A-LR je povezan model splošne cirkulacije ozračja in oceanov, ki ga je razvil Institut Pierre Simon Laplace v Franciji. Oba modela se uporabljata za napovedovanje prihodnjih podnebnih sprememb na podlagi različnih scenarijev emisij toplogrednih plinov. [13]

<sup>5</sup>GEV (Generalized Extreme Value) je statistični model, ki je namenjen modeliranju ekstremnih dogodkov. Uporablja se za oceno verjetnosti pojava v prihodnosti na podlagi opazovanj preteklih dogodkov.

rezultat, da bodo v  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  toplejšem svetu maksimalne vrednosti  $T_m$  višje za  $1.33\text{--}1.49\text{ }^{\circ}\text{C}$  [14].

## 6.4 Negotovosti in podcenjevanje ekstremnih vrednosti

Ker se modeliranje in napovedovanje najnevarnejših vlažnih vročinskih valov že po definiciji ukvarja z ekstremnimi vrednostmi, se je potrebno zavestno izogibati podcenjevanju le teh.

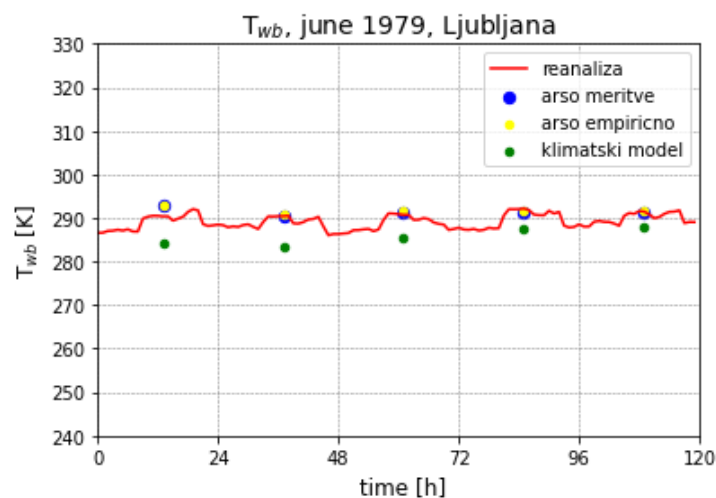
V reanalizah so meteorološke spremenljivke navedene npr. za vsako uro v dnevu in razporejene po geografski mreži z določeno ločljivostjo; ustvari se dosledna ocena, kako se je vreme spreminjalo v preteklosti, vključno s podatki, ki jih niso zabeležili, kar raziskovalcem omogoča celovitejše razumevanje vremenskih vzorcev. Meteorološke spremenljivke so torej homogeno razpostavljene po mreži in časovno gostejše. Ob tem se je potrebno zavedati, da prostorsko-časovni prostor še vedno ni povsem zapolnjen/gladek - meteorološke spremenljivke so navedene diskretno tako v prostoru kot tudi v času, kar pomeni omejeno resolucijo. Za pridobitev vrednosti za območje med točkami na mreži uporabljamo interpolacijo, s čimer zgladimo območje med robovi. Na ta način izpovprečimo vrednosti meteoroloških spremenljivk, medtem ko relief in morebitna mikroklima med opredeljenimi točkami ostaneta spregledana. Pri mnogo statističnih nalogah to ne bi bil problem, pri ekstremnih pojavih pa običajno še toliko pogosteje velja, da se pojavljajo močno lokalizirani in le na kratkih časovnih intervalih. Ekstremne vrednosti so torej lahko zglajene/izpovprečene, njihova amplituda pa s tem podcenjena.

V omenjenih raziskavah so bile izmerjene vrednosti navadno uporabljene iz baze HadISD [15], za reanalizo pa ECMWF-jev ERA-Interim, ki se je v glavnem uporabljal med leti 2006 in 2019. Ločljivost ERA-Interim ima na mreži Zemlje približno  $0,75$  stopinje po geografski širini in dolžini, kar ustreza približno  $80$  km na ekvatorju [11]. Znotraj celice  $80 \times 80$  kilometrov se morda nahajajo pregreta, gosto poseljena mesta, kotline s samosvojo mikroklimo, orografske ovire in tako naprej. Časovna ločljivost je  $6$  ur, znotraj katerih akutno pregrevanje ali vlažen veter morda nista vključena. Z vsega tega tudi izhaja komentar, da so se  $T_m > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  že pojavile, samo ne na dovolj velikem časovnem in prostorskem intervalu, da bi bilo očitno na reanalizah [3]. Diskrepanca med reanalizo in meritvami se pokaže že na sliki 4: trendi v ERA-Interim so v močni korelaciji s tistimi iz HadISD, vendar so pri najvišjih vrednostih nižji, kar je v skladu s podcenjevanjem ekstremnih  $T_m$  v ERA-Interim. To pomeni, da bi se kljub znanstvenim napovedim, da bi zadrževanje globalnega segrevanja pod  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  omejilo pojavljanje vlažnih vročinskih valov s  $T_m > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , še lahko obstajali omejeni prostorski predeli, za katere to ne drži.

## 6.5 Negotovosti na slovenskem območju

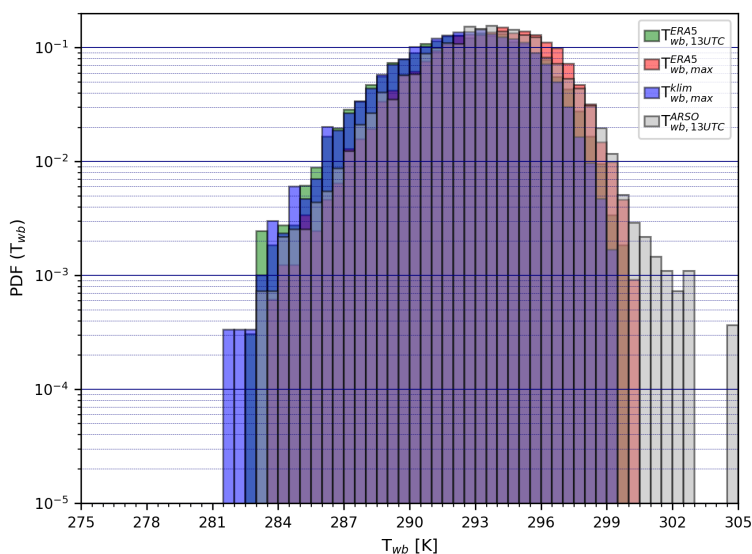
Da bi ugotovila, ali reanalize za slovenski prostor podcenjujejo vrednosti mokrega termometra, sem jih z meritvami primerjala tudi sama. Tokrat sem obravavala novejšo reanalizo ERA5, ki jo je prav tako razvil ECMWF in je v uporabi od leta 2019. V primerjavi z ERA-Interim ima večjo prostorsko ( $0,25 \times 0,25$  stopinje po geografski širini in dolžini) in časovno (meteorološke spremenljivke so navedene za vsako uro) ločljivost ter daljši niz podatkov za preteklost [16]. Primerjava še ni zaključena, vendar se je za nekaj tednov, kolikor sem jih ročno preverila, izkazalo, da se izmerjena in iz reanalize pridobljena  $T_m$

v Sloveniji dobro ujemata, klimatski model pa izstopa zaradi pričakovanja dosti nižjih vrednosti. Primer enega od rezultatov primerjave je na sliki 6, vendar pa je še vedno potrebno sistemsko preveriti vsak teden od 1979 pa do 2017 ter ugotoviti smeri, velikosti in verjetnosti sistemskih napak.



Slika 6: Primerjava temperature mokrega termometra kot sta jo predvidela reanaliza ERA5, klimatski model, direktna meritve  $T_m$  na Arsu in  $T_m$ , izračunana iz temperature suhega termometra, kot je bila izmerjena na Arsu. Meritve in reanaliza se dobro ujemajo.

Razlike med meritvami, reanalizami in klimatskimi modeli za merilno postajo letališča Portorož (pred začetkom kontinuiranih meritev so dopolnjeni z meritvami za Dragonjo) so vidne tudi na sliki 7, ki prikazuje, s kakšno verjetnostjo bo  $T_m$  zasedla katero od vrednosti v tromesečju junij, julij in avgust (JJA). Ugotovimo, da najvišje temperature, kar so jih kdaj zabeležili na ARSO, niso zajete niti z reanalizami niti s klimatskim modelom. Skrajnih repov verjetnostne porazdelitve  $T_m$  torej ne opišejo niti reanalize niti klimatski modeli.  $T_m$  je bila iz podatkov o temperaturi in relativni vlažnosti zraka izračunana po empirični formuli.

Verjetnostna porazdelitev  $T_{wb}$  po empirični formuli - stacked, JJA, Dragonja/Portoro

Slika 7: Primerjava verjetnosti za določeno  $T_m$  letališča Portorož med meritvijo ob 13. uri in reanalizo ERA5 ob enaki uri, maksimalno vrednostjo reanalize, klimatskim modelom. Avtor slike Matic Pikovnik, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani.

## 7 Zaključek

Da globalno segrevanje s sabo prinaša za človeštvo neugodne posledice, je že dolgo znano. Ena od teh je povečanje tako frekvence kot temperature mokrega termometra vlažnih vročinskih valov. Vlažna vročina je že nekaikrat povzročila smrtne žrtve epidemioloških razsežnosti, pri čemer je že  $T_m = 28^\circ\text{C}$  dovolj za resno poslabšanje psihofizičnega počutja;  $35^\circ\text{C}$  je limita človeške tolerance. Najbolj ogroženi so ljudje iz obalnih območji subtropskega pasu - omeniti velja Monsunsko Azijo, Rdeče morje, Mehiški zaliv in Kalifornijski zaliv, najbolj ekstremne vrednosti pa se pojavljajo v Perzijskem zalivu. Dejavniki, ki povečujejo tveganje za nastanek vlažnih vročinskih valov, so med drugim visoka temperatura površine morja, poletni monsun in El Niño južna oscilacija. Velik vpliv ima tudi antropogeno globalno segrevanje, saj frekvence pojavljanja valov od začetka industrijske dobe vztrajno naraščajo. Pri tem je opaziti, da se meritve in reanalize v trendih ujema, vendar reanalize lahko podcenjujejo ekstremne vrednosti. Če se želimo kot človeštvo zaščititi pred vročinskimi valovi s  $T_m$  nad  $35^\circ\text{C}$ , bi morali dvig povprečne temperature v tropih omejiti na največ  $1.5^\circ\text{C}$ .

Ob zaključku seminarja je potrebno povedati, da zaradi mraza še vedno umre bistveno več ljudi kot zaradi vročine. Med leti 1985 and 2012 naj bi neoptimalne temperature okolice letno povzročile 7,71% žrtev (7,43–7,91%). Od tega naj bi po prvi raziskavi od prehode vročine umrlo okrog 0,42%, od mraza pa 7,29% ljudi letno [17]. Smrtnost zaradi previsokih temperatur se v zadnjih letih povečuje, smrtnost zaradi mraza pa zmanjšuje. Celokupna smrtnost zaradi neprimernih temperatur okolice se je v zadnjih letih zmanjšala.

Nevarnosti vročinskih valov bodo morale biti kmalu bolj znani tudi širši javnosti. Samo tako se lahko na njih kolektivno pripravimo in omejimo fatalne posledice za javno zdravje - v idealnem primeru pa tudi pojavljanje valov samih.

## 8 Literatura

- [1] Žiga Zaplotnik, Katarina Kosovelj, and Matic Šavli. Meteorološka opazovanja in inštrumenti - vaje. Predavanja pri predmetu Meteorološka opazovanja in inštrumenti, 2020.
- [2] Gregor Skok. Uvod v meteorologijo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2020.
- [3] Colin Raymond, Tom Matthews, and Radley M. Horton. The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances*, 6(19), May 2020.
- [4] Adrian Zbiciak and Tymon Markiewicz. A new extraordinary means of appeal in the polish criminal procedure: the basic principles of a fair trial and a complaint against a cassatory judgment. *Access to Justice in Eastern Europe*, 6(2):1–18, March 2023.
- [5] Luke A Parsons, Yuta J Masuda, Timm Kroeger, Drew Shindell, Nicholas H Wolff, and June T Spector. Global labor loss due to humid heat exposure underestimated for outdoor workers. *Environmental Research Letters*, 17(1):014050, January 2022.
- [6] Andrea de Bono, Gregory Giuliani, Stéphane Kluser, and Pascal Peduzzi. Impacts of summer 2003 heat wave in europe. *UNEP/DEWA/GRID Eur. Environ. Alert Bull.*, 2:1–4, 01 2004.
- [7] Hannah Hoag. Russian summer tops 'universal' heatwave index. *Nature*, October 2014.
- [8] Robert E. Davis, Glenn R. McGregor, and Kyle B. Enfield. Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environmental Research*, 144:106–116, January 2016.
- [9] Lenard Milich. Deserts of the world. Zapiski na oseni spletni strani.
- [10] Lijie Lin, Chongcheng Chen, and Ming Luo. Impacts of elniño-southern oscillation on heat waves in the indochina peninsula. *Atmospheric Science Letters*, 19(11):e856, September 2018.
- [11] D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kállberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, and F. Vitart. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656):553–597, April 2011.
- [12] GFDL - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Global Climate Model CM3. [https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html). Accessed: 13. 4. 2023.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change, Representative Concentration Pathways (RCPs). <https://www.gfdl.noaa.gov/coupled-physical-model-cm3/>. Accessed: 13. 4. 2023.
- [14] Yi Zhang, Isaac Held, and Stephan Fueglistaler. Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics. *Nat. Geosci.*, 14(3):133–137, March 2021.

- [15] R. J. H. Dunn, K. M. Willett, P. W. Thorne, E. V. Woolley, I. Durre, A. Dai, D. E. Parker, and R. S. Vose. HadISD: a quality-controlled global synoptic report database for selected variables at long-term stations from 1973–2011. *Climate of the Past*, 8(5):1649–1679, October 2012.
- [16] Hans Hersbach, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dinand Schepers, Adrian Simmons, Cornel Soci, Saleh Abdalla, Xavier Abellan, Gianpaolo Balsamo, Peter Bechtold, Gionata Biavati, Jean Bidlot, Massimo Bonavita, Giovanna Chiara, Per Dahlgren, Dick Dee, Michail Diamantakis, Rossana Dragani, Johannes Flemming, Richard Forbes, Manuel Fuentes, Alan Geer, Leo Haimberger, Sean Healy, Robin J. Hogan, Elías Hólm, Marta Janisková, Sarah Keeley, Patrick Laloyaux, Philippe Lopez, Cristina Lupu, Gabor Radnoti, Patricia Rosnay, Iryna Rozum, Freja Vamborg, Sebastien Villaume, and Jean-Noël Thépaut. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049, June 2020.
- [17] Antonio Gasparrini, Yuming Guo, Masahiro Hashizume, Eric Lavigne, Antonella Zanobetti, Joel Schwartz, Aurelio Tobias, Shilu Tong, Joacim Rocklöv, Bertil Forsberg, Michela Leone, Manuela De Sario, Michelle L Bell, Yue-Liang Leon Guo, Chang fu Wu, Haidong Kan, Seung-Muk Yi, Micheline de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, Paulo Hilario Nascimento Saldiva, Yasushi Honda, Ho Kim, and Ben Armstrong. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, 386(9991):369–375, July 2015.