

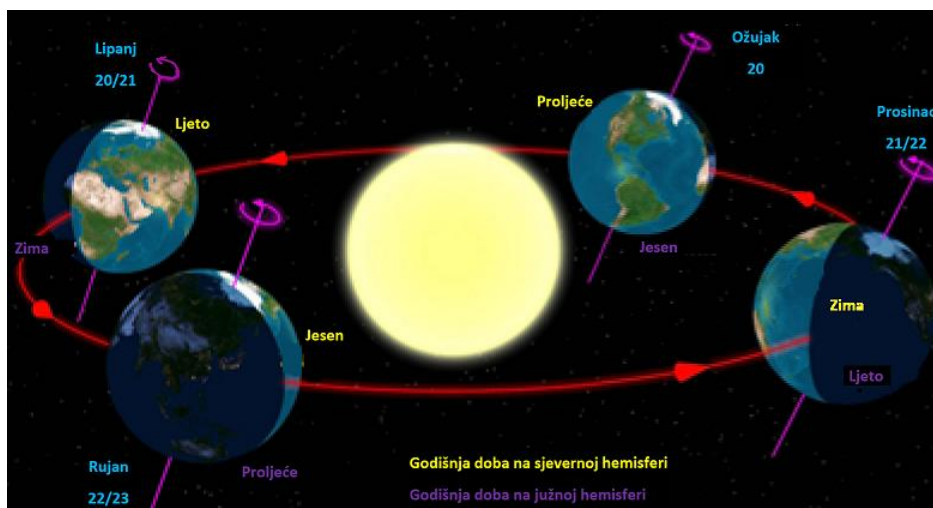
Klimatske promjene i globalno zagrijavanje

Da bi temperatura na Zemlji bila stalna, kao što smo već više puta spomenuli, ulazna i izlazna energija na vrhu atmosfere moraju biti u ravnoteži. Promjena ulazne ili izlazne energije uzrokovat će porast ili smanjenje temperature na Zemlji. Povećanje ulazne ili smanjenje izlazne energije uzrokuju porast temperature, a smanjenje ulazne i povećanje izlazne energije uzrokuju smanjenje temperature. U ovom poglavlju diskutirat ćemo neke čimbenike koji mogu utjecati na promjene ulazne ili izlazne energije te njihovu (ne)povezanost s opaženim trendom povećanja prosječne svjetske temperature u zadnjih nekoliko desetljeća.

Prirodni pokretači klimatskih promjena

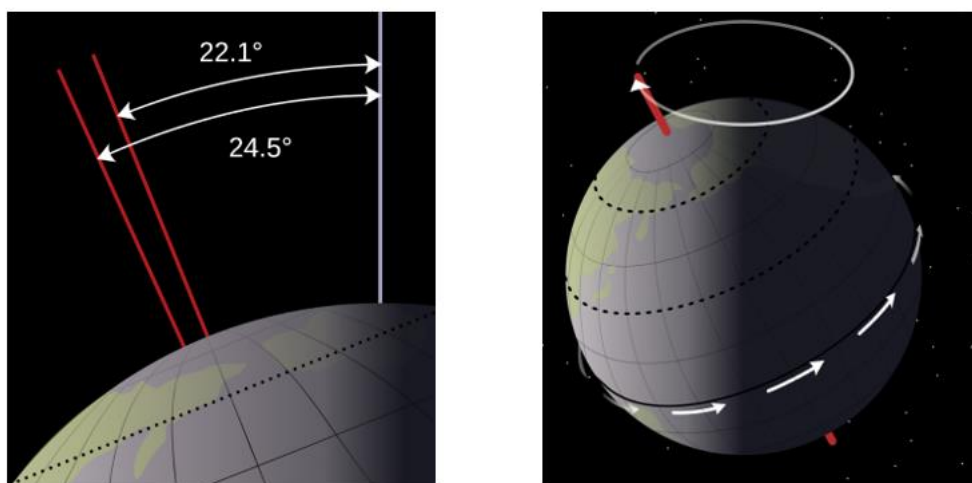
Sunčevo zračenje je glavni izvor energije na Zemlji. Danju je obično toplije nego noću jer Sunce svojim zračenjem zagrijava Zemljinu površinu. Tijekom godine imamo izmjene godišnjih doba. Zimi dani traju kraće nego noći za razliku od ljeta pa je to ujedno i jedan od razloga zašto je zima hladnije godišnje doba. Ali zašto uopće dolazi do izmjene godišnjih doba te zašto zimi dani traju kraće?

Česta učenička miskoncepcija je da se zimi Zemlja nalazi dalje od Sunca nego ljeti. Ustvari je situacija (na sjevernoj polutci) obrnuta. U siječnju je Zemlja na dijelu putanje koji je bliži Suncu nego u srpnju, a na ekvatoru pak nema izmjene godišnjih doba. S druge strane, kada je na sjevernoj polutci ljeto, na južnoj je zima. Možemo zaključiti da udaljenost Sunca od Zemlje ne igra ulogu u izmjeni godišnjih doba pa uzrok treba potražiti u nekoj drugoj karakteristici Zemljinog položaja u odnosu na Sunce, a to je **nagnutost Zemljine osi**. Zemljina zamišljena os rotacije ima nagib u odnosu na putanju oko Sunca. Na polutci koja je nagnuta prema Suncu je ljeto, dok je na drugoj zima. Drugim riječima, kut pod kojim Sunčeve zrake upadaju na neku točku (ili paralelu) Zemlje povećava se od zime do ljeta. Kada je na južnoj polutci ljeto Zemlja se nalazi bliže Suncu nego kada je na sjevernoj polutci ljeto, a zimi je pak dalje. Zbog toga bi, da Zemlja nema ocean, godišnja doba bila ekstremnija na južnoj polutci. Međutim, zbog toga što na južnoj polutci ima manje kopna nego na sjevernoj, a ocean se sporo zagrijava te sporo hladi, godišnja doba su zapravo blaža na južnoj polutci.



Slika 5.1.1 Godišnja doba (izvor: <https://en.wikipedia.org/wiki/Season>)

Nagib Zemljine osi trenutno iznosi 23.5° . Zbog gravitacijskog međudjelovanja Zemlje sa Suncem i Mjesecom, događa se **promjena nagiba** Zemljine osi između vrijednosti 22.1 i 24.5° u tijekom 41 000 godina. Što je nagib Zemljine osi manji to su godišnja doba blaža (poput proljeća i jeseni), dok veći nagib znači ekstremnija godišnja doba na većim geografskim širinama. Promjena nagiba osi događa se poprilično sporo.



Slika 5.1.2 Promjena nagiba Zemljine osi (lijevo) i precesija Zemljine osi (desno) (izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles)

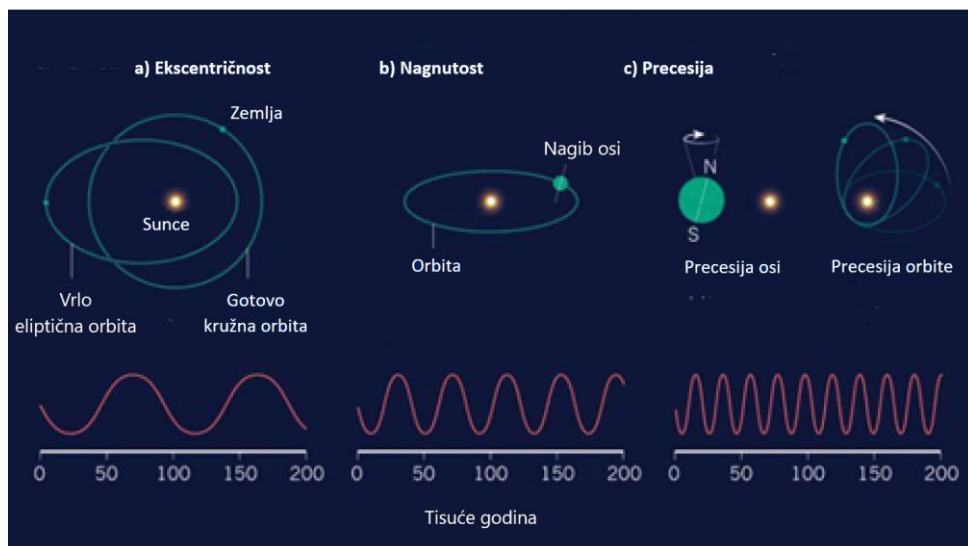
Zemljino gibanje je poprilično složeno. Osim što se vrti oko vlastite osi i giba oko Sunca, Zemlja ujedno i **precesira**¹ u periodima od 26 000 godina zbog gravitacijskog međudjelovanja sa Suncem i Mjesecom. To znači da dio putanje koji trenutno odgovara ljetu na sjevernoj polutci će s vremenom odgovarati zimi.

¹ Precesija je složeno gibanje prilikom kojeg rotirajuća os zbog djelovanja vanjske sile na tijelo opisuje kružnicu (poput zvrka).

Zemljina orbita oko Sunca nije stalno jednaka jer, osim gravitacijskog međudjelovanja sa Suncem, Zemlja gravitacijski međudjeluje i s ostalim planetima Sunčevog sustava. Zemljina orbita je **elipsa promjenjivog ekscentriciteta**, a trenutno je dosta slična kružnici. (Ekscentricitet elipse je omjer udaljenosti jednog njenog fokusa od središta i velike poluosi pa se izražava u granicama od 0 do 1. Što je udaljenost fokusa od središta manja, to je ekscentricitet bliži nuli, a elipsa sličnija kružnici.) Unatoč tome razlika u količini primljene svjetlosti u perihelu i afelu je 7%. Ekscentricitet se mijenja u periodičkim ciklusima od oko 100 000 godina zbog gravitacijskog privlačenja Jupitera i Saturna, najvećih planeta Sunčevog sustava. Povećanjem ekscentriciteta razlika u primljenom zračenju može narasti na čak 23%.

Osim navedenih ciklusa postoji i ciklus vezan za rotaciju ravnine u kojoj Zemlja rotira oko Sunca u periodima od 100 000 godina te ga se može povezati s izmjenama ledenih doba, iako nije u potpunosti jasno kako promjena nagiba ravnine utječe na količinu energije koju Zemlja prima od Sunca.

Navedene cikluse, povezanost promjena gibanja Zemlje i klime opisao je matematičar i građevinar Milutin Milanković pa su njemu u čast nazvani Milankovićeви ciklusi.



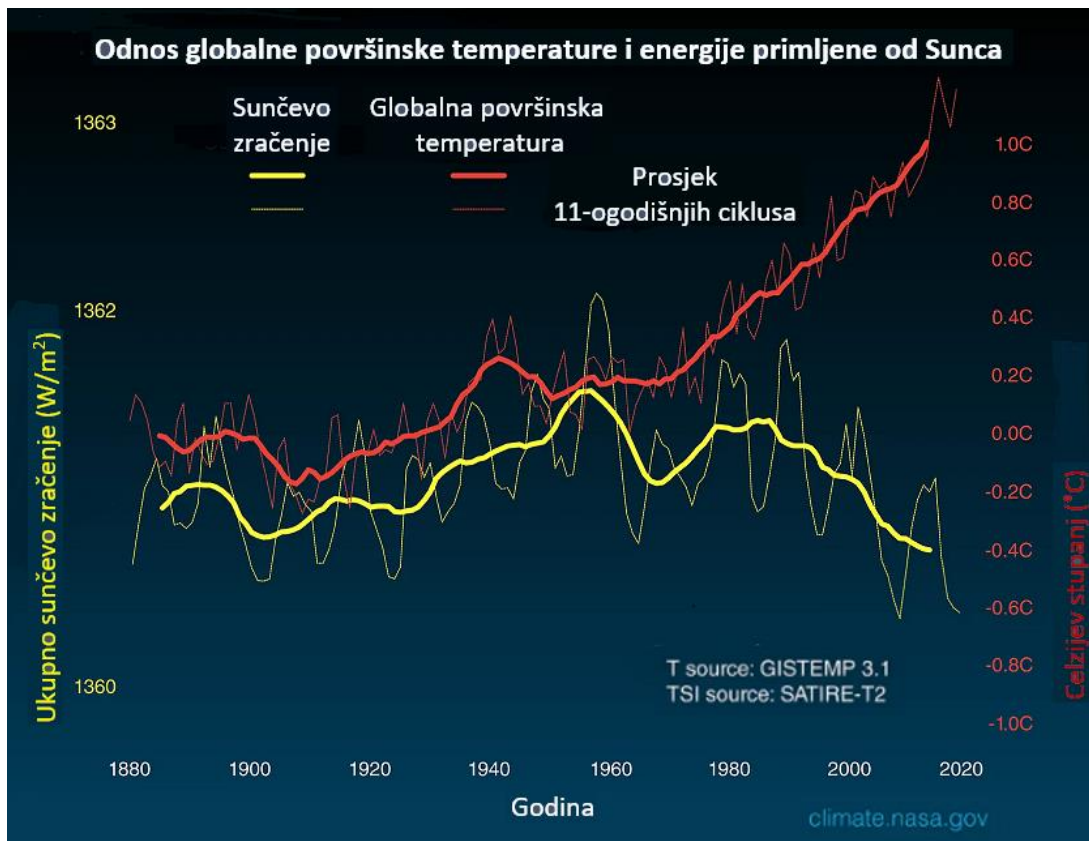
Slika 5.1.3 Milankovićeви ciklusi i periodi (izvor: https://www.researchgate.net/publication/328730355_Astronomical_climate_theory_from_the_point_of_vortical_physics)

Sve navedene promjene zbivaju se vrlo sporo. Nagib Zemljine osi smanjuje se, ali slabije intenzivna godišnja doba zapravo bi trebala doprinijeti rastu ledenog pokrivača na Zemlji. Povećanje ledenog pokrivača uzrokuje povećanje albeda što smanjuje apsorpciju Sunčevog zračenja pa samim time dodatno smanjuje temperaturu. Dakle, prema Milankovićevim ciklusima, Zemlja bi zapravo trebala postajati hladnija. Međutim, to nije promjena uočljiva na vremenskoj skali usporedivoj sa ljudskim životnim vijekom.

U zadnjih 100 godina uočen je porast globalne temperature zbog čega umjesto o globalnom zahlađenju više govorimo o globalnom zatopljenju ili zagrijavanju. Navedene promjene zbivaju se vrlo sporo što je dodatni razlog zašto se nagli porast temperature ne može opravdati Milankovićevim ciklusima.

Gravitacijska međudjelovanja, napose Zemlje i Mjeseca, uzrokuju tektonska gibanja. Pomicanje tektonskih ploča može uzrokovati promjene oceanskih struja kao i vulkansku aktivnost što može imati posljedice na klimu. Nekad u prošlosti tektonska aktivnost te izdizanje planinskih masiva uzrokovali su nestajanja drevnih mora što je u konačnici imalo utjecaja i na klimu određenog područja. Vulkanskim erupcijama moguća su izbacivanja velikih količina ugljikovog dioksida i vodene pare u atmosferu što za posljedicu ima povećanje temperature. Tektonske promjene odvijaju se vrlo sporo dok su vulkanske erupcije nepredvidive, ali erupcije najvećih vulkana se zbivaju vrlo rijetko (jednom u 100 000 do 200 000 godina i više). Ljudska aktivnost ipak na godišnjoj razini doprinosi povećanju koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi 100 puta više nego svi vulkani zajedno.

Količina energije sa Sunca također se mijenja u prirodnim Sunčevim 11-ogodišnjim ciklusima. Naime, otprilike svakih 11 godina magnetski polovi Sunca zamijene mjesta. U međuvremenu se događaju promjene Sunčeve aktivnosti. Sunčeva aktivnost određuje se brojem Sunčevih pjega koje nastaju pod utjecajem magnetskog polja. Što je broj Sunčevih pjega veći, veća je aktivnost Sunca pa tako i solarna konstanta. Razdoblje u kojemu je broj Sunčevih pjega najmanji zovemo Solarni minimum, a razdoblje u kojemu je broj Sunčevih pjega najmanji zovemo Solarni maksimum. Broj Sunčevih pjega razlikuje se od minimuma do minimuma, odnosno od maksimuma do maksimuma. Promjene u solarnoj konstanti tijekom solarnih ciklusa su vrlo male – oko 0,1 %. Nije zabilježen ukupni porast količine Sunčeve energije koji bi se mogao povezati s povećanjem globalne temperature. Čak i da je to slučaj povećanje temperature bi se primijetilo u svim slojevima atmosfere dok je zasad povećanje zabilježeno u nižim slojevima, a u višima smanjenje. Zapravo, prošli solarni ciklus (solarni ciklus 24, 2008.-2019.) bio je slabiji od prethodnih i znanstvenici su pretpostavljali da će Sunce, nastavi li se ta slaba aktivnost, nastupiti razdoblje koje zovemo Veliki Solarni minimum. To je razdoblje vrlo niske aktivnosti kada više solarnih ciklusa zaredom imaju aktivnost nižu od višedesetljetnog ili višestoljetnog prosjeka. Ipak, to ne bi značilo će Zemlja prestati primati dovoljno Sunčeve energije te se unatoč tome očekuje nastavak globalnog zagrijavanja. Ipak, Sunce u trenutnom solarnom ciklusu koji je započeo 2020. (solarni ciklus 25) ima veću aktivnost nego u prošlom što sigurno neće doprinijeti smanjenju trenda zagrijavanja. Odnos temperature na Zemlji i Sunčeve aktivnosti još je predmet istraživanja, ali iz slike 5.1.4 vidi se da trend temperature u 20. stoljeću ne odgovara trendu solarne aktivnosti. Stoga, prirodno se nameće zaključak da je za današnje klimatske promjene odgovorno ljudsko djelovanje koje povećava koncentraciju stakleničkih plinova u atmosferi.



Slika 5.1.4 Odnos globalne površinske temperature (crvena) i energije primljene od Sunca (žuta). Deblja žuta linija je prosjek jedanaestogodišnjih Sunčevih ciklusa (tanja žuta linija). (izvor: [climate.nasa.gov](https://climate.nasa.gov/faq/14/is-the-sun-causing-glob), <https://climate.nasa.gov/faq/14/is-the-sun-causing-glob>)

Kao što vidimo, klima se kroz povijest neprestano mijenjala bez obzira na čovjeka pa su klimatske promjene pojam koji nema nužno veze s čovjekom. Prilikom poučavanja o klimatskim promjenama nužno je raspraviti o prirodnim uzrocima klimatskih promjena te o njihovoj važnosti. Da nije bilo klimatskih promjena kroz povijest te da su uvjeti na Zemlji statični ne bi bilo ni pojave čovjeka, a vjerojatno ni života na Zemlji. Globalno zatopljenje je pojam koji se odnosi na trend porasta svjetske prosječne temperature i jedan je od dokaza današnjih klimatskih promjena. Budući da je taj trend prilično ubrzan predstavlja opasnost za mnoga živa bića na Zemlji.

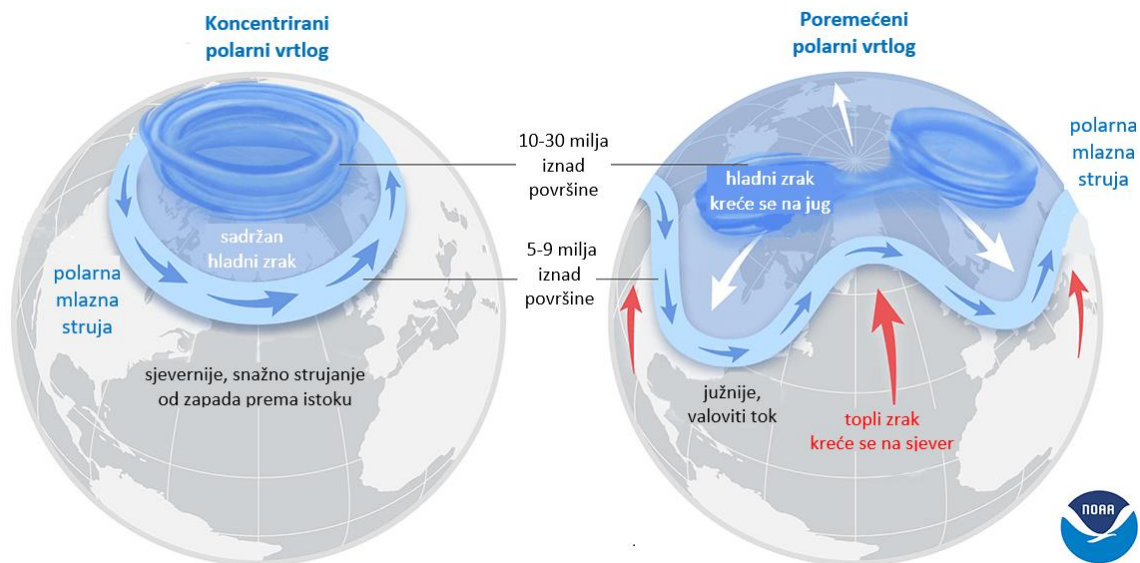
Povezanost globalnog zagrijavanja i ekstremno hladnih događaja

Iako su zime na sjevernoj hemisferi generalno sve blaže, javljaju se razdoblja ekstremnih hladnoća poput onih koje su pogodile Sjevernu Ameriku u 12. mjesecu 2022. Skeptici klimatskih promjena često upravo takve događaje koriste kao protuprimjere globalnom zagrijavanju.

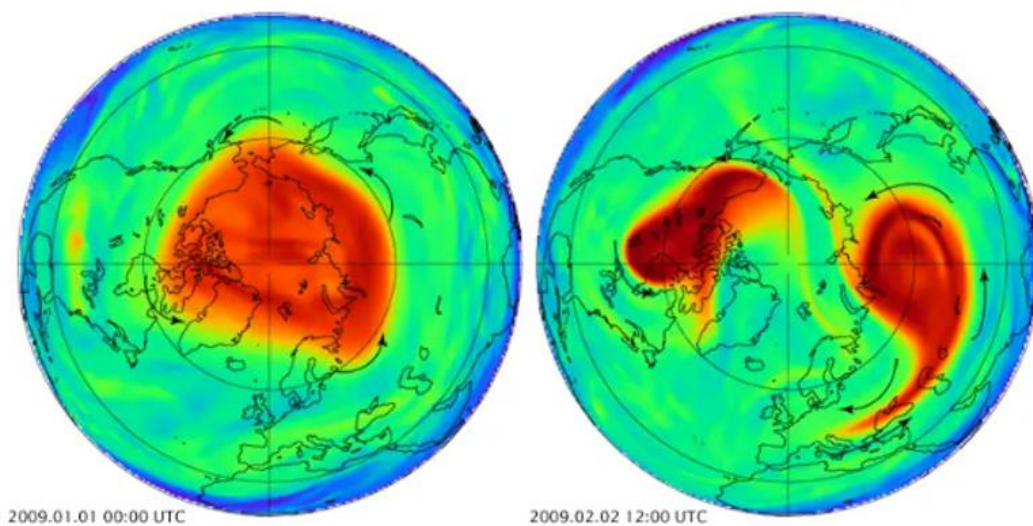
Spuštanje hladnog polarnog zraka u srednje geografske širine povezano je s trendom zagrijavanja. Početkom jeseni količina svjetlosti na sjevernom polu značajno se smanjuje zbog nagiba Zemljine osi što uzrokuje brzo hlađenje. Na južnijim geografskim širinama i dalje ima dovoljno svjetlosti zbog čega taj dio Zemlje ostaje topao. Zbog Zemljine rotacije i sudara toplih zračnih masa koje ide prema sjeveru i hladnih zračnih masa koje se spuštaju prema jugu, iznad polova u stratosferi nastaje vrtlog zraka koji zovemo polarni vrtlog. Polarni vrtlog u stratosferi javlja se samo zimi, a postoji i polarni vrtlog u troposferi koji je prisutan tijekom cijele godine, ali je slabiji pa ćemo dalje nazivom polarni vrtlog govoriti o polarnom vrtlogu u stratosferi. Također, na Zemlji postoje dva polarna vrtloga – jedan na sjevernom, a drugi na južnom polu, ali radi jednostavnosti, govorit ćemo o sjevernom polarnom vrtlogu (i zbog toga što su promjene sjevernog polarnog vrtloga češće).

Ispod polarnog vrtloga, bliže tlu (troposfera) nalazi se polarna mlazna struja koja razdvaja topliji zrak srednjih geografskih širina i hladniji polarni zrak. Što je razlika u temperaturi između toplijeg i polarnog zraka veća, to je putanja mlazne struje stabilnija i pravilnija, a polarni vrtlog koncentriraniji iznad sjevernog pola. Takvo stanje odgovara vrlo hladnim polarnim temperaturama te blagim zimama u srednjim geografskim širinama. Kako zbog globalnog zagrijavanja temperatura Arktika raste, temperaturna razlika između sjevernog pola i srednjih geografskih širina se smanjuje zbog čega putanja mlazne struje postaje krivudava, a polarni vrtlog oslabi i prestane biti koncentriran iznad sjevernog pola. Odnos između promjena polarnog vrtloga i polarne mlazne struje prikazan je na slici 5.2.1. Zbog toga se polarni hladni zrak širi u južnija područja donoseći ekstremno niske temperature područjima za koja takvi zimski uvjeti nisu karakteristični. Moguće je čak da polarni vrtlog toliko oslabi te se podijeli u dva (prikazano na slici 5.2.2) ili više manjih vrtloga ili čak privremeno promijeni smjer vrtnje. Povezanost između polarnog vrtloga i polarne mlazne struje ide i u drugom smjeru, odnosno, promjene u polarnom vrtlogu mogu oslabiti polarnu mlaznu struju. Slabljenju polarnog vrtloga prethodni *iznenadno zagrijavanje stratosfere*, pojava prodiranja toplog zraka iz troposfere u stratosferu. Iznenadno zagrijavanje stratosfere je prirodna pojava koja je posljedica kombinacije klimatske varijabilnosti i klimatskih faktora, ali također je povezano s razlikama u temperaturi između polova i ekvatora.

Međusobna povezanost polarnog vrtloga i polarne mlazne struje, kao i povezanost globalnog zagrijavanja te događaja iznenadnog zagrijavanja stratosfere trenutno su predmet brojnih istraživanja. Razumijevanje ovih pojava može doprinijeti boljem predviđanju i pripremi na ovakve događaje koji nerijetko uzrokuju velike štete te odnose živote.



Slika 5.2.1 Pravilna mlazna struja i koncentrirani polarni vrtlog (lijevo) i zakrivljena mlazna struja i poremećeni polarni vrtlog (desno). (izvor: NOAA, <https://scijinks.gov/polar-vortex/>)



Slika 5.2.2 Polarni vrtlog koncentriran iznad sjevernog pola (lijevo) i dva polarna vrtloga u južnijim geografskim širinama (desno) (izvor: NASA Earth Observatory, 2009., [Stratosphere Influences Winter Weather \(nasa.gov\)](http://StratosphereInfluencesWinterWeather.nasa.gov))