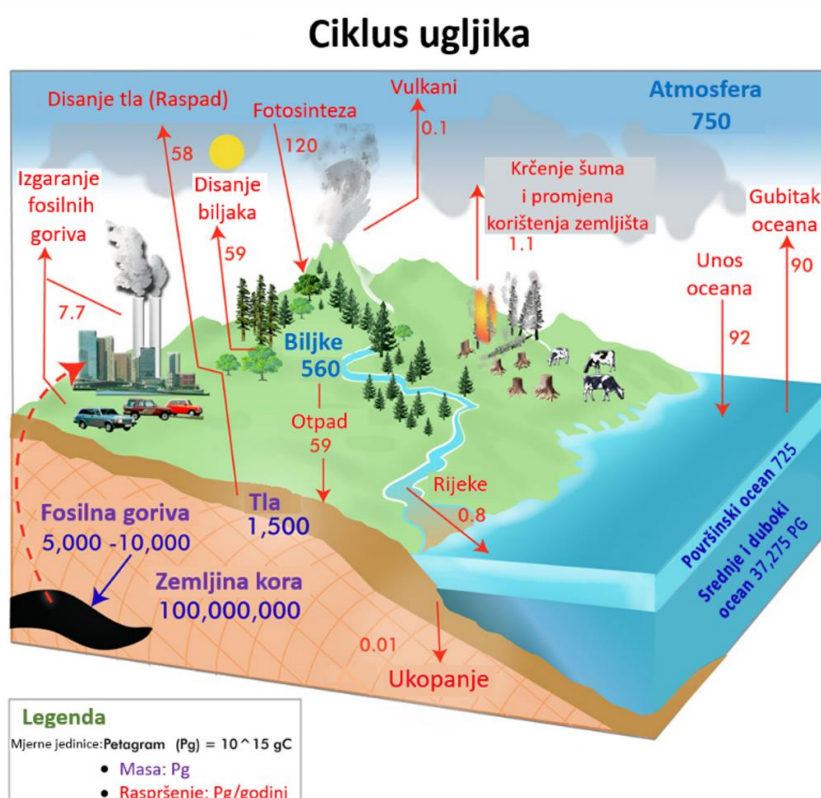


## Kruženje ugljika u prirodi. Ugljikov dioksid i temperatura

Sve što živi sadrži ugljik. Ugljik kao i voda, ali i svi drugi elementi, neprestano kruži u prirodi izmjenjujući oblike i spojeve u kojima se nalazi. Ugljik je spremljen u živim organizmima u različitim spojevevima poput ugljikohidrata, lipida, proteina i nukleinskih kiselina, ali i u neživim tvarima poput zemlje, stijena i sedimenata. Ugljik iz živih organizama se kroz prirodu kreće u bržem procesu nego ugljik pohranjen u neživim tvarima pa kažemo da postoje brzi i spori ciklus ugljika.



Slika 7.1 Ciklus ugljika (izvor: <https://www.nasa.gov/topics/nasalife/features/globe-workshop.html>)

## Spori ciklus ugljika

Iz atmosfere u litosferu ugljik može doći kišom. Ugljikov dioksid u atmosferi reagira s vodom i stvara ugljičnu kiselinu. Ugljična kiselina otapa stijene (trošenje stijena) pri čemu nastaju ioni kalcija, magnezija, kalija i natrija koji rijekama dolaze do mora. Kalcij se tamo spaja s bikarbonatnim ionima<sup>1</sup> i

<sup>1</sup> Otapanjem ugljikovog dioksida vodi nastaje ugljična kiselina. Ugljična kiselina se dalje razlaže na vodikove i bikarbonatne ione. Reakcija se događa i u suprotnom smjeru – bikarbonatni i vodikovi ioni stvaraju ugljičnu kiselinu.

tvori **kalcijev karbonat** čijim nakupljanjem tijekom dugog vremena (milijuni godina) nastaju **stijene**. Kalcijev karbonat stvaraju i neki živi organizmi. Morski organizmi koriste kalcij i bikarbonatne ione za izgradnju svojih kalcificirajućih oklopa (npr. krednjaci, koralji, školjke...). Organizmi nakon uginuća tonu na dno i nakon dugog vremena i nakupljanja njihovih ostataka formiraju se stijene. Ako se slojevi uginulih organizama nakupljaju brže nego se mogu raspadati, u anaerobnim uvjetima pri visokom tlaku i temperaturi nastaju **fosilna goriva** umjesto stijenja. Dakle, morski organizmi imaju ključnu ulogu u ciklusu ugljika jer uzimaju ugljikov dioksid iz vode i atmosfere da bi izgradili svoje oklope, a njihovim uginućem i taloženjem ugljik ne sudjeluje u ciklusu dugi vremenski period. Ovi dugotrajni procesi pripadaju tzv. sporom ciklusu ugljika.

Ugljik iz sporog ciklusa prirodnim putem se u atmosferu vraća **vulkanskim otpuštanjem plinova**. Osim otpuštanja plinova (najviše vodene pare, ugljikovog dioksida i sumporovog dioksida) i aerosola (dim, čađa, itd.) u atmosferu, erupcijom vulkana tlo se prekriva novom silikatnom stijenom (stijena koja uz silicij i kisik sadrži i neke elemente poput kalcija, magnezija, itd.) te spori ciklus kreće ispočetka.

U sporom ciklusu ugljika otpuštanje ugljikovog dioksida u atmosferu, osim kroz vulkanske erupcije, odvija se **izmjenom plinova atmosfere i oceana**. Pri miješanju morske vode i zraka ugljik oslobađa se ugljikov dioksid u atmosferu. Kada se ugljikov dioksid pak otopi u vodi nastaje ugljična kiselina. U sporom ciklusu ugljika prolazi oko  $10^{13}$  do  $10^{14}$  grama ugljika godišnje.

Prije industrijske revolucije količina ugljikovog dioksida pohranjena u mora trošenjem stijena bila je uravnotežena s otpuštanjem ugljikovog dioksida iz mora u atmosferu.

Što više ugljikovog dioksida ima u atmosferi, to ga ocean više apsorbira. Međutim više apsorbiranog ugljikovog dioksida ima svoju cijenu – povećava se kiselost mora. Naime, ugljična kiselina disocira na bikarbonatne i vodikove ione. Što se u nekoj otopini nalazi više vodikovih iona, to je otopina kiselija.

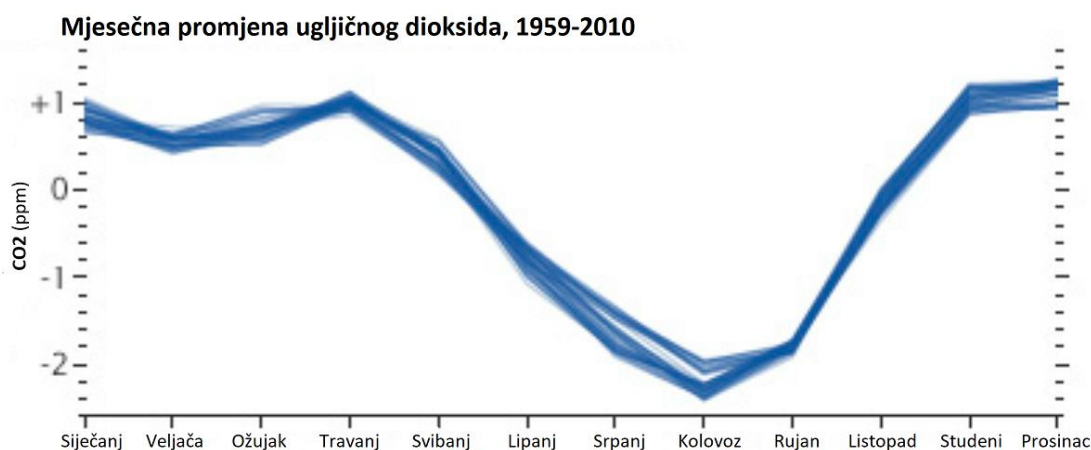
## Brzi ciklus ugljika

Budući da ugljik može stvoriti čak četiri veze po atomu, postoji velik broj varijacija kompleksnih organskih molekula zbog čega ugljik ima ključnu ulogu u živim organizmima na Zemlji. Atomi ugljika mogu tvoriti dugačke lance i prstenove u čijim je snažnim vezama pohranjena velika količina energije.

Aerobni organizmi staničnim disanjem proizvode ugljikov dioksid i tako ga otpuštaju u atmosferu. S druge strane, organizmi koji vrše fotosintezu koriste ugljikov dioksid uz svjetlost i vodu stvarajući kisik i ugljikohidrate koji im služe za rast i pohranu energije. Sav ugljik u Zemljinoj vegetaciji tamo je pohranjen procesom fotosinteze. Fotosintetski organizmi uzimaju ugljikov dioksid iz atmosfere te ga pretvaraju u različite forme organskog ugljika.

Fotosintetski organizmi su biljke, fitoplanktoni i neke alge, stoga su osnovni dio brzog ciklusa ugljika. Molekule glukoze koje nastaju fotosintezom su jednostavni šećeri koje autotrofi mogu koristiti za energiju ili pretvoriti u druge oblike ugljika za rast biomase u kojima se također skladišti energija. Druga bića konzumirajući fotosintetske organizme pa time i organske molekule dobivaju energiju za rast i razvoj. Uginućem živih organizama (autotrofnih ili heterotrofnih) dolazi do njihova raspada, odnosno bakterijske razgradnje. U tom procesu dolazi do oksidacije ugljikohidrata pri čemu se otpuštaju voda, ugljikov dioksid i energija. Dio ugljika pri tome završava u tlu, a dio kao ugljikov dioksid u atmosferi. U anaerobnim uvjetima razgradnja organske tvari događa se sporijim procesom kojim se otpuštaju metan, dušikov oksid i sumporovodik. Kemijski isti proces kao razgradnja u aerobnim uvjetima događa se i gorenjem organske tvari kada ugljikov dioksid također završava u atmosferi.

Koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi mijenja se tijekom godine te je najveća zimi, a najmanja tijekom ljeta. Promjene u količini atmosferskog ugljikovog dioksida povezane su s rastom vegetacije. Zimi (sjeverna hemisfera) je proces fotosinteze smanjen jer više vegetacije odumire nego raste zbog smanjene količine svjetlosti, dok na proljeće vegetacija buja. Zato je koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi veća zimi nego ljeti. Iz toga se vidi bliska poveznica količine vegetacije i koncentracije ugljikovog dioksida.



Slika 7.2.1 Mjesečna promjena koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi (izvor: <https://www.earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>)

## Utjecaj čovjeka na ciklus ugljika

Ljudi su oduvijek dio ciklusa ugljika, i to brzog ciklusa ugljika. Građeni smo od spojeva ugljika, hranimo se spojevima ugljika te izdišemo ugljikov dioksid. Čovjek disanjem ne utječe na povećanje koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi jer ugljikov dioksid koji izdišemo potječe od ugljika iz brzog ciklusa, odnosno iz ugljika nastalog fotosintezom (bilo da je riječ o hrani biljnog ili životinjskog porijekla). Taj isti ugljikov dioksid će ponovo sudjelovati u procesu fotosinteze i tako u krug.

Međutim, čovjek ipak na drugi način utječe na povećanje ugljikovog dioksida u atmosferi. Od industrijske revolucije način čovjekova života značajno se promijenio. Ljudi su počeli koristiti strojeve za čiji su rad potrebna fosilna goriva. Izgaranjem fosilnih goriva u atmosferu se otpušta ugljikov dioksid koji potječe od ugljika koji nije sudjelovao u ciklusu više stotina milijuna godina. Da nema čovjeka, taj ugljik bi se otpuštao u atmosferu polako milijunima godina kroz vulkansku aktivnost kao dio sporog ciklusa. Dakle, dodavanje ugljika iz sporog ciklusa u atmosferu je odgovorno za povećanje koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi. Osim toga, krčenjem šuma uklanja se vegetacija koja bi uzimala ugljikov dioksid iz atmosfere te zamjenjuje s vegetacijom koja značajno manje sudjeluje u fotosintezi.

Kroz povijest se koncentracija ugljikovog dioksida mijenjala sporo, ali ciklički pod utjecajem klimatskih promjena uzrokovanih Milankovićevim ciklusima. Promjene koncentracije ugljikovog dioksida u korelaciji su s promjenama temperature. Mjerenja pokazuju da je danas u atmosferi koncentracija ugljikovog dioksida veća nego ikad u prethodnih 800 000 godina zbog čega se očekuje značajni porast temperature. Međutim, porast koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi danas nije uzrokovan Milankovićevim ciklusima već korištenjem fosilnih goriva.

## **Odnos koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi i temperature atmosfere**

Kao što je već spomenuto, koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi i temperatura atmosfere blisko su povezani. Ugljikov dioksid kao staklenički plin dobro apsorbira toplinsko zračenje zbog čega ga djelomično zadržava u atmosferi.

Jasno je da povećana koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi dovodi do toga da se više topline zadržava te samim time da se temperatura atmosfere povećava. Povezanost koncentracije ugljikovog dioksida i temperature nije jednosmjerna. Vidjeli smo (1. poglavlje, Varijabilnost klime, slika 1.2) da povećanje jedne veličine odgovara povećanju druge i obratno. Međutim, kauzalnost nije poznata. Drugim riječima, ne može se točno reći kada je u povijesti povećanje koncentracije ugljikovog dioksida dovelo do povećanja temperature, a kada je povećanje temperature dovelo do povećanja koncentracije ugljikovog dioksida. Taj drugi smjer odnosa ugljikovog dioksida i temperature najviše ovisi o oceanu.

Količina Sunčevog zračenja koje dolazi na Zemlju značajno utječe na klimu i mijenja se kroz Milankovićeve cikluse. Jasno je da se smanjenjem količine zračenja smanjuje i temperatura Zemlje. Iako se ocean hladi sporije nego kopno, ipak se hladi. Temperatura oceana značajno utječe na ciklus ugljika. Naime, što je voda hladnija to ona može apsorbirati više ugljikovog dioksida nego topla jer topivost plinova u vodi raste sa smanjenjem temperature. Tako hladniji ocean apsorbira više ugljikovog dioksida iz zraka smanjujući pritom koncentraciju ugljikovog dioksida u zraku. Smanjena koncentracija

CO<sub>2</sub> u zraku uzrokuje daljnje hlađenje. S druge strane, povećanjem temperature oceana molekule se gibaju brže, više se sudaraju te molekule vode istiskuju molekule plinova koje sada imaju dovoljno energije da napuste tekućinu. Stoga, povećanje temperature uzrokuje povećanje koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi.

Povećanje temperature uzrokovano povećanjem ugljikovog dioksida u atmosferi ne događa se trenutno zbog toga što se ocean sporo zagrijava, a većina planeta je vodena. To znači čak i da prestanu daljnje emisije staklenički plinova u atmosferu, očekuje se daljnji porast prosječne temperature.