ALTERNATOR
Misliti znanost.

Mikroorganizmi in makroposledice

12. 11. 2026

Number: 24/2026

Author:

- Cene Gostinčar



Ilustracija: Milanka Fabjančič

© Milanka Fabjančič in ZRC SAZU, 2026. Vse pravice pridržane. Brez predhodnega pisnega dovoljenja imetnika avtorskih pravic ni dovoljeno reproduciranje, distribuiranje, javna priobčitev, predelava ali druga uporaba ilustracije v kakršnemkoli obsegu ali postopku.

Zgodnje jeseni leta 1991 se je osem ljudi za dve leti poslovilo od običajnega življenja in se izoliralo od sveta. Niso se izstrelili v vesolje, temveč so se zaprli v 1,27 ha velik ekosistem v ameriški zvezni državi Arizona, imenovan Biosfera 2. Rastlinjaku podobna konstrukcija je vsebovala miniaturne približke deževnega gozda, savane, puščave, mangrov in oceana, pa tudi poljedelske površine in bivališče za ljudi. Skupina je poskusila živeti povsem neodvisno od zunanjega sveta, prejemali so le energijo v obliki sončnega sevanja in elektrike.

Poskus (https://doi.org/10.34133/2021/8067539) ni potekal povsem gladko. V dobrem letu je delež kisika v ozračju zaprtega sistema padel z običajnih 20,9 % na 14,5 % in zaradi varnosti raziskovalcev so morali odmerek kisika dodati od zunaj. Mikroorganizmi v prsti so iz velikih količin organske snovi proizvedli veliko ogljikovega dioksida. Večina vrst vretenčarjev in opraševalcev je izumrla, prekomerno pa se je namnožila vrsta invazivnih mravelj – in ščurki. Zapletlo se je tudi pri medosebnih odnosih. Raziskovalci so se razdelili v dve sovražni si skupini z različnimi pogledi na znanstvene prioritete poskusa. Eksperiment tako ni razkril le nekaterih zanimivosti o delovanju ekosistemov, temveč tudi o človekovi naravi (in znanstvenem okolju).

Kdor je že kdaj poskusil pri življenju obdržati miniaturen ekosistem v zaprtem kozarcu, ve, kako hitro gredo stvari lahko narobe. Živo zelena preproga mahu se utekočini v neugledno anaerobno goščo, rastline prerastejo plesni, stene prekrijejo alge in ostanki drobnih polžev, ki so se zadušili zaradi pomanjkanja kisika. Ko posamezni dogodki presežejo kapaciteto sistemov za vzdrževanje ravnovesja, sledi veriga zapletov, ki miniaturni ekosistem izjemno hitro potisnejo v nepovraten propad. To se zgodi celo v mnogo enostavnejših (https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.12.002) in znanstveno skrbno načrtovanih sistemih. Mikroorganizmi v takšnem okolju sčasoma vzpostavijo novo ravnovesje, a to je običajno neprepoznavno in precej manj idilično od začetnega stanja.

Naš planet seveda ni kozarec za vlaganje. Zaradi svoje velikosti in prepletenosti je sposoben ublažiti in izravnati znatne šoke, ne da bi ga ti iztirili. Oceani vsrkavajo in oddajajo neizmerne količine toplote in ogljikovega dioksida, plankton in kopenske rastline ohranjajo stabilno koncentracijo zračnega kisika, velika raznovrstnost živih bitij skoraj neopazno zapolni vrzeli, ki nastanejo zaradi izumiranja vrst. Nebotičnik je veliko težje prevrniti kot eno samo opeko. Pri tem pa pozabljamo, da če nam to vendarle uspe, ga je tudi bistveno težje postaviti nazaj. Očarani nad tehnološkim napredkom in ujeti v

vsakdanje težave skoraj verjamemo, da smo se osamosvojili od bioloških sistemov planeta, na katerem živimo. Celo če se zavedamo globalne preobrazbe zadnjih desetletij, ob tem običajno najprej pomislimo na severne medvede, koralne grebene in velika drevesa deževnih pragozdov.

Živali in rastline so seveda še kako pomembne, a pravi domorodci našega planeta so v resnici mikroorganizmi. Pojavili so se dolgo pred kompleksnimi večceličnimi bitji. Skozi milijarde let so vzpostavili pogoje za življenje, kot ga poznamo danes. S fotosintezo so ozračje postopoma napolnili s kisikom (https://asm.org:443/articles/2022/february/the-great-oxidation-event-how-cyanobacteria-change%20) . S tem so povzročili izumrtje dobršnega deleža takratnih organizmov, hkrati pa omogočili energetsko izredno učinkovito dihanje s kisikom. Z nastankom ozonske plasti (https://doi.org/10.5194/bg-10-3983-2013) in oblikovanjem prsti so omogočili poselitev kopnega, ki je bilo večji del zgodovine prazna puščava. V preobrazbi, ki se je ne bi sramovala niti znanstvena fantastika, so Zemljo iz neprijaznega kupa kamenja in vode spremenili v planet, ki prekipeva od življenja.

O grožnjah, ki jih človeštvu predstavljajo mikroorganizmi, ne manjka razprav. Proti antibiotikom odporne vrste bakterij ogrožajo temelje sodobne medicine. Prihajajoče pandemije bi lahko še resneje posegle v prepletene sisteme civilizacije, kot se je to zgodilo pred nekaj leti. Glivni patogeni rastlin ogrožajo prehransko varnost. Razvoj molekularne biologije in umetne inteligence obeta nesluten napredek, a odpira tudi nove priložnosti za bioterorizem (https://doi.org/10.1787/3e6510cf-en) . Vse to so resne težave, vendar utegnejo mikroorganizmi na našo prihodnost vplivati v še veliko večji meri. Njihova sposobnost spreminjanja planeta se namreč ni končala v davni geološki preteklosti – tudi danes uravnavajo delovanje ekosistemov in skrbijo za kroženje snovi, ki jih za svoj obstoj potrebujemo vsa živa bitja.

Mikroorganizmi so pomemben razlog za to, da podnebnih sprememb ne moremo opisati s preprosto enačbo, v katero bi vstavili zgolj neto količino proizvedenega ogljikovega dioksida. Metabolna aktivnost mikroorganizmov v različnih okoljih pomembno vpliva tako na vezavo ogljika v organske snovi kot tudi na njegovo sproščanje. Čeprav o amazonskem deževnem gozdu pogosto govorimo kot o pljučih planeta, polovico ogljikovega dioksida na Zemlji v resnici porabijo fotosintetski organizmi, ki so del morskega planktona. Na kopnem rastline res predstavljajo večji del vezanega ogljika, a pri razgradnji rastlinske biomase (in s tem sproščanju ogljika nazaj v ozračje) imajo ključno vlogo spet mikroorganizmi. Ti, še posebno bakterije in glive, rastlinam pomagajo tudi pri pridobivanju hranil, zlasti fosforja in dušika, ter s tem pospešujejo njihovo rast. Na razmerje med vezavo in sproščanjem ogljika iz kopenskih ekosistemov pa vplivajo tudi številne druge interakcije med rastlinami in mikroorganizmi. Pri tem je za marsikoga presenetljivo, da je največ ogljika kopenskih sistemov shranjenega v prsti in ne denimo v deblih velikih dreves. Naraščanje temperatur (https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5) bo po pričakovanjih sproščanje tega ogljika še pospešilo.

Bliže polarnim območjem pa na nas preži še ena tempirana bomba: biomasa, ki se je skozi tisočletja nakopičila v šotiščih in večno zamrznjenih tleh – permafrostu. Tam je shranjena več kot polovica ogljika, ki ga najdemo v tleh. S podnebnimi spremembami, izsuševanjem šote in taljenjem permafrosta se mikrobna aktivnost teh sistemov močno povečuje. Že z zvišanjem globalne temperature za 1,5–2,0 °C se bo po napovedih odtalila skoraj polovica permafrosta. Še bolj zaskrbljujoče pa je to, da se zaradi pomanjkanja kisika velik delež ogljika iz permafrosta in šote ne sprošča v obliki ogljikovega dioksida, temveč v obliki metana, ta pa na Zemlji toploto zadržuje še bistveno bolje. Napovedni modeli (https://doi.org/10.1038/s41558-018-0095-z) kažejo, da bo do konca stoletja večino podnebnih sprememb povzročal ogljik, ki se sprošča iz okolij brez kisika.

Ogromne količine metana nastajajo tudi v prebavilih prežvekovalcev in na riževih poljih, s prekomernim gnojenjem in neustrezno obdelavo poljedelskih površin pa pospešujemo nastajanje še enega plina, dušikovega oksida. Tudi tega proizvajajo mikroorganizmi. Čeprav je znan kot smejalni plin, njegovi učinki niso nič kaj zabavni, saj toploto v ozračju zadržuje še mnogo učinkoviteje kot metan. Koncentraciji metana in dušikovega oksida v ozračju zadnja leta strmo naraščata (https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5) in dopolnjujeta učinke ogljikovega dioksida. Kmetijstvu namenjamo že skoraj polovico kopnega, delež pa še kar narašča (https://doi.org/10.1038/s43016-021-00429-z) . Masa udomačenih sesalcev je že desetkrat večja (https://doi.org/10.1038/s41467-025-63888-z) od mase vseh divjih sesalcev na planetu, vključno s sloni in kiti.

Mikroorganizmi na podnebje vplivajo na še bolj nenavadne načine. Morski (pa tudi kopenski) aerosoli delujejo kot kondenzacijska jedra za nastanek vodnih kapljic, s čimer pospešujejo nastanek oblakov. Pomembno vlogo (https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5) v teh aerosolih imajo tudi mikroorganizmi in snovi, ki jih proizvajajo.

Posledice teh procesov težko natančno napovemo, o njihovi nevarnosti pa ni dvoma, saj ustvarjajo pozitivne povratne zanke. Segrevanje povzroča taljenje permafrosta, to pa pospešuje segrevanje. Če prekoračimo točke ravnovesja, bodo takšne pozitivne povratne zanke še naprej slabšale razmere na planetu, tudi če bomo povsem prenehali s trenutnim globalnim vandalizmom uporabe fosilnih goriv. Naše možnosti bodo tedaj bistveno bolj omejene, kot so danes, zato bi lahko takrat posegli po radikalnih rešitvah. Ideje o načrtnem spreminjanju planeta, geoinženirstvu, omenjamo vse glasneje. Obsegajo vse od polnjenja ozračja z aerosoli, ki bi zasenčili planet, do namestitve zrcal v vesolje med Soncem in Zemljo.

V nekaterih od predlaganih rešitev bi uporabili tudi mikroorganizme. S tako imenovanim gnojenjem oceanov z mineralnimi hranili, kot je železo, bi lahko pospešili rast mikroorganizmov in v njihove celice ujeli del ogljika iz ozračja – pravzaprav bi sprožili cvetenje alg, ki bi ogljikov dioksid porabile kot vir ogljika za svojo rast. V danes že znamenitem poskusu iz leta 1993 (https://doi.org/10.1038/371123a0) so raziskovalci v morje odvrgli skoraj pol tone železovega sulfata in že po

štiriindvajsetih urah v vodi zaznali močno povečano fotosintetsko aktivnost. Morda lahko celo ustvarimo (https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.04.001) in v okolje sprostimo mikroorganizme, ki bodo ogljikov dioksid pretvarjali v težko razgradljive polimere ali spodbujali nastajanje kalcijevega karbonata in drugih mineralnih oblik ogljika. Takšne ideje nemara zbujajo upanje, da za podnebne spremembe obstajajo enostavne rešitve, a v resnici prinašajo več vprašanj kot odgovorov. Kdo lahko odloča o ukrepih, ki bi lahko vplivali na celoten planet? So to posamezne države, Organizacija združenih narodov ali kdo tretji? Smo lahko prepričani, da velikopotezni posegi v ekosisteme, ki so že zdaj pod pritiskom podnebnih sprememb, ne bodo povzročili še veliko večje škode? To je, kot bi svet ustrelili v koleno, potem pa ga s slabo odmerjenimi brcami poskušali spraviti nazaj na noge. Manj vpadljiva, a varnejša in bolj uresničljiva so najbrž prizadevanja, ki vključujejo uporabo mikroorganizmov v bolj omejenem obsegu. Ta prizadevanja ponujajo konkretne rešitve, denimo načrtno spreminjanje mikrobnih združb za omejevanje sproščanja metana v kmetijstvu in pri predelavi odpadkov. Raziskav (https://doi.org/10.64628/AA.hnrrumgac) na tem področju ni malo, a njihov prenos iz laboratorijev v prakso v globalnem merilu zaenkrat ostaja težko premostljiva ovira.

Ljudje smo iznašli načine za preživetje v večini okolij na planetu. Ne le masa udomačenih živali, tudi skupna masa ljudi je že zdavnaj presegla maso vseh divjih sesalcev (https://doi.org/10.1038/s41467-025-63888-z) . To sicer ni presenetljivo – silovito povečanje populacije je logična posledica eksponentne rasti, ki je v ugodnih razmerah značilna za praktično vsak organizem. A če povečana populacija zahteva več virov, kot jih ponuja okolje , se znajde v hudih težavah. S svojo iznajdljivostjo pri izkoriščanju naravnih virov takšen scenarij odrivamo v prihodnost, vendar s tem tudi temeljito spreminjamo planet. Zemljo smo pririnili že daleč iz zelene doline preteklega ravnovesja in niti sanja se nam ne, kako blizu je vrh, na katerem se klanec prevesi v sosednjo dolino. Tam nam utegnejo stvari dokončno uiti izpod nadzora. Tudi če bomo s svojim nespametnim početjem prenehali, se bodo procesi, ki smo jih sprožili, nadaljevali. Planet se nam bo skotalil po drugem bregu, se dolgo časa valil sem in tja od enega do drugega ekstrema (paradoksalno, zanesti nas utegne celo v ledeno dobo (https://doi.org/10.1126/science.adh7730) – in na koncu za tisočletja ali dlje obtičal v novem, veliko manj prijaznem ravnovesju (https://doi.org/10.64628/AB.jeuncrtsp) .

Razmere, v katerih živimo, so odvisne od prepletenih sistemov, ki se ne odzivajo linearno. Ti sistemi blažijo in zakrivajo posledice naših dejanj, a če so izzivi prehudi, lahko takšni sistemi v verigi katastrof, ki kot domine sledijo ena drugi, tudi odpovedo. Huda suša lahko prek pomanjkanja vodnih virov in hrane hitro pripelje do resnih družbenih posledic. Spremenjene razmere predstavljajo za rastline in živali stres, s čimer povečujejo njihovo občutljivost za patogene mikroorganizme. To dodatno ogroža ekosisteme pa tudi našo lastno prehransko varnost. Območja bolezni, kot je malarija, katerih prenašalci nekoč na hladnejših območjih niso preživeli, se širijo vse dlje od ekvatorja (https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5) . Ko v takšne verige dogodkov dodamo še družbene dejavnike, kot so naraščajoča neenakost, politični ekstremizem in nova oboroževalna tekma, postane preživetje človeštva silno zapleteno.

Podnebne spremembe niso napaka, na kateri bi se lahko učili, saj druge priložnosti skoraj zagotovo ne bomo dobili. Pa tudi če bi jo, razumnost našega ravnanja ni samoumevna – za to ne potrebujemo zapletenih napovednih modelov, temveč se moramo le ozreti v zgodovino. Leta 1994 so ponovili poskus v zgoraj opisanem kompleksu Biosfera 2. Uspešno so identificirali in odpravili nekatere pomanjkljivosti sistema, a poskus se je kljub temu končal še slabše kot prvič. Zasebni milijarder, ki je zagotovil sredstva za projekt, je po sporih med upravljavci projekta na njegovo čelo postavil agresivnega investicijskega bankirja. Pod njegovim vodstvom se je celotna zgodba končala z razprtijami, nasilnim odprtjem kompleksa in predčasnim zaključkom poskusa ter dolgotrajnim sodnim procesom. Omenjeni bankir je bil Steve Bannon, ki je kasneje postal zloglasni svetovalec predsednika Trumpa in je še danes eden od mnenjskih voditeljev ameriške skrajne desnice.

Četudi je znanost za razumevanju sveta okrog nas nesporno naše najmočnejše orodje, ni neodvisna od družbenega dogajanja, temveč je z njim neločljivo prepletena. Izjemno odgovorne odločitve o naši prihodnosti niso na ramenih raziskovalk in raziskovalcev, temveč so stvar politike in družbe kot celote. Upamo lahko, da bodo te odločitve pravočasne in osnovane na znanstvenih dognanjih in ne na trditvah prodajalcev megle, ki ponujajo čudežne rešitve. Popolnih odgovorov v resničnem svetu ni – negotovost je sestavni del prihodnosti. Tudi nedvomno pomembne vloge mikroorganizmov v prihodnosti človeštva ne razumemo v celoti, še manj pa jo znamo natančno napovedati, kljub vse boljšim in vse bolj kompleksnim napovednim modelom. Enako bi lahko zatrdili tudi za dobro staro človeško nespamet, a to je že druga zgodba.

https://www.alternator.science/en/long/mikroorganizmi-in-makroposledice/