ALTERNATOR
Misliti znanost.

# Vloga meduz pri kroženju ogljika v morju

3. 9. 2026

Številka: 32/2026

Avtorji:

- Črtomir Ernesto Perharič Bailey
- Tinkara Tinta
- Matjaž Ličer

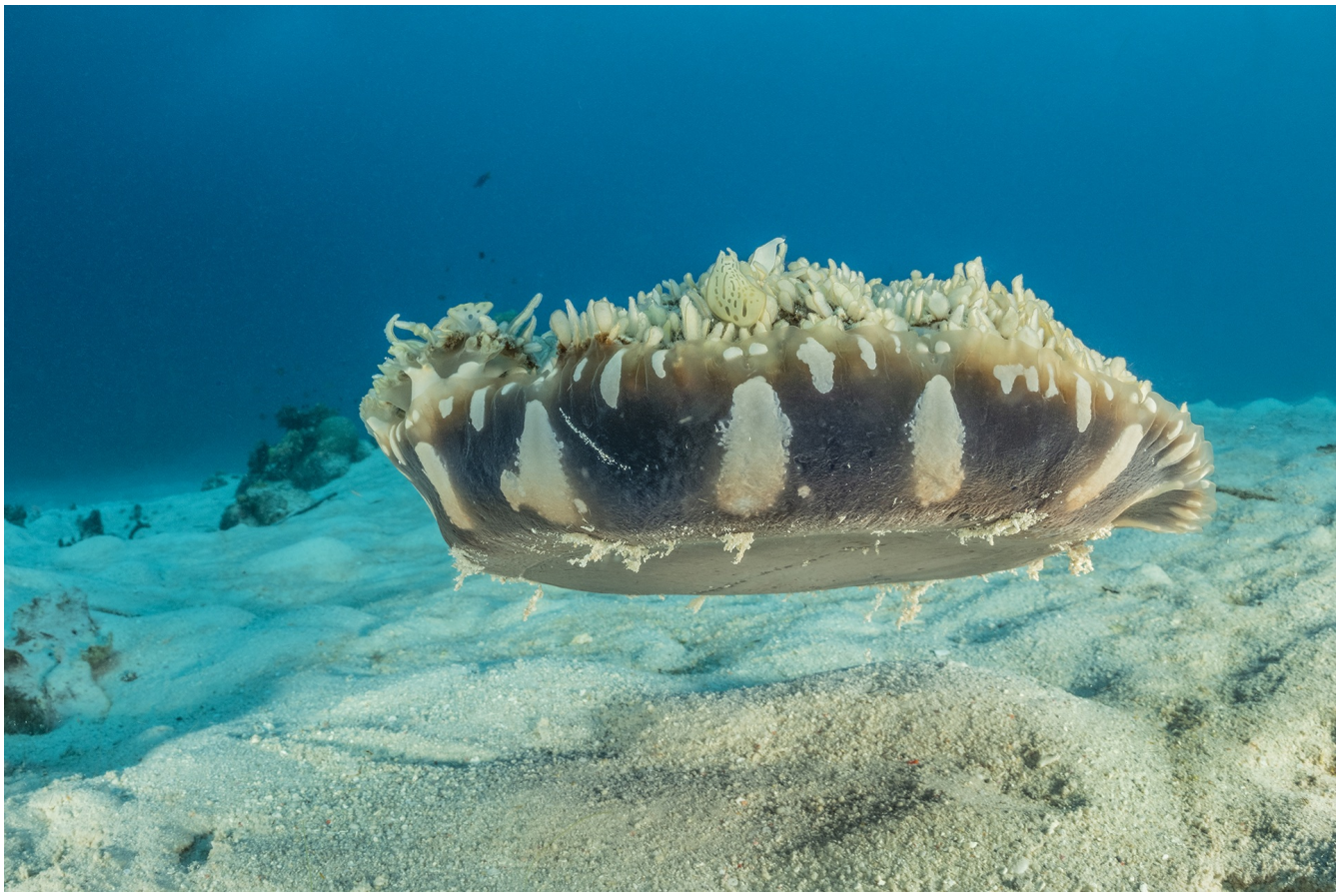
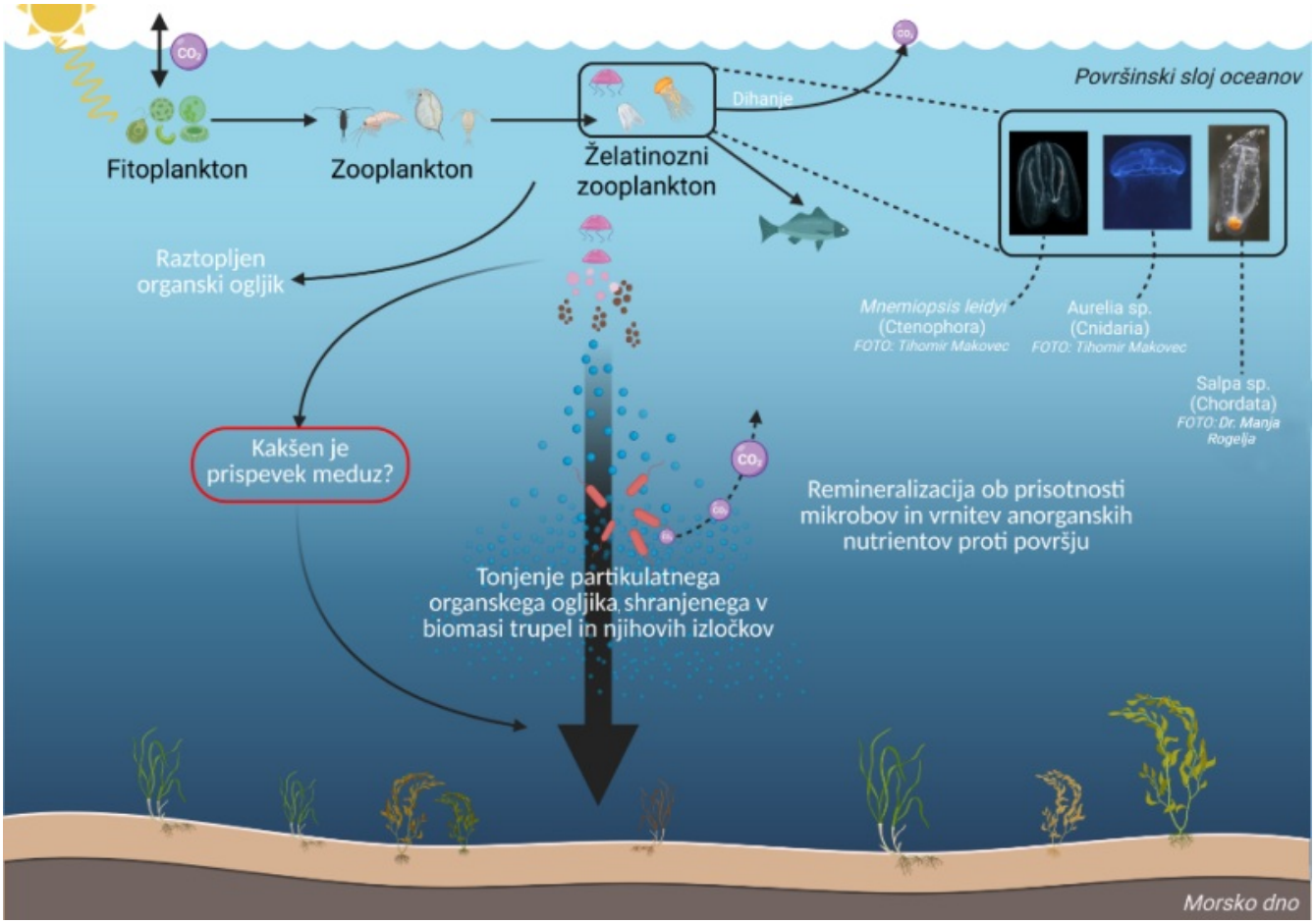


Foto: Borut Furlan. Zahvaljujemo se avtorju za prijazen brezplačen odstop fotografije za objavo.

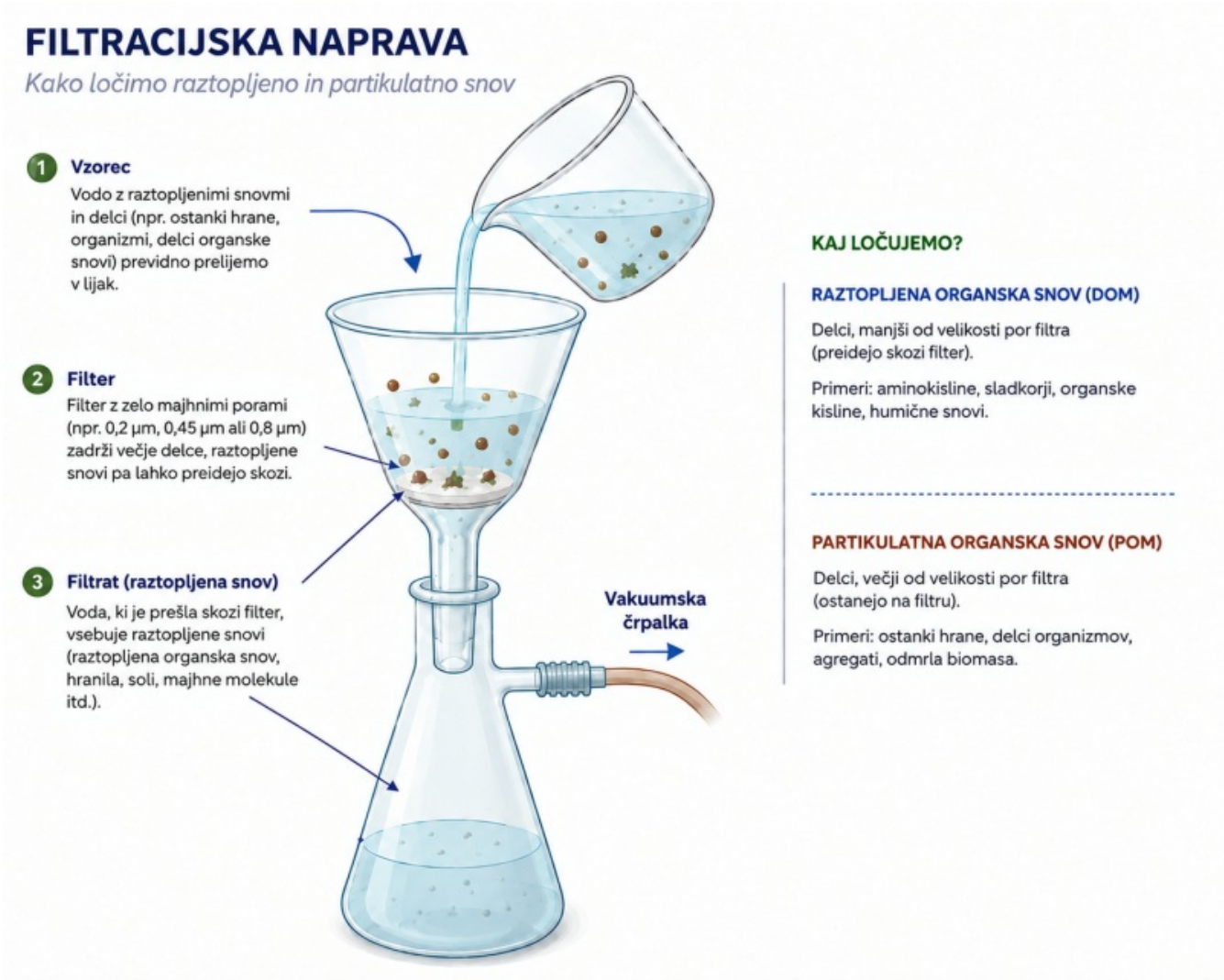
Izpusti toplogrednih plinov soustvarjajo energijsko sliko našega planeta ter s tem vplivajo na razmere na Zemlji. Kljub temu danes še nimamo povsem jasne slike o tem, kako potekajo tokovi toplogrednih plinov, denimo ogljikovega dioksida ($CO_2$), med atmosfero in oceanom. Vemo, da $CO_2$ neprestano prehaja iz atmosfere v ocean in nazaj ter da se raztaplja v površinskih plasteh oceana. Ni pa povsem jasno, kaj se s tem $CO_2$ zgodi v oceanu kasneje, denimo koliko ga potone in izgine v oceanskih globinah ter kateri mehanizmi k temu prispevajo. Fizikalnim procesom, ki črpajo $CO_2$ iz atmosfere v morje in nazaj, pravimo fizikalna ogljična črpalka. Sem spadajo denimo zajem zračnih mehurčkov v razpenjenem morju in transport teh ujetih in raztopljenih plinov v globine s turbulentnim mešanjem ali vertikalnimi morskimi tokovi.

Podobno skupini bioloških oceanskih procesov, ki skupaj uravnavajo koncentracijo ogljika v oceanih in ozračju, pravimo biološka ogljična črpalka (https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_pump) (Slika 1). V procesih biološke ogljične črpalke odigra pomembno vlogo plankton. Tu ločimo med rastlinskim (fitoplankton) in živalskim planktonom (zooplankton). Poleg tega plankton navadno ločimo po velikosti, kjer so predstavniki fitoplanktona v splošnem manjši (0,2–200 µm). Predstavniki zooplanktona so precej večji (od 20 µm do 20 mm) in vključujejo celo organizme, denimo želatinozni zooplankton, ki so lahko veliki nekaj metrov.




Slika 1: Poenostavljena shema vloge želatinoznega zooplanktona (meduz) v biološki ogljični črpalki. Fotografije različnih predstavnikov želatinoznega zooplanktona desno zgoraj sta posnela Tihomir Makovec (NIB, Slovenija) (levo in sredina) ter doc. dr. Manja Rogelja (Univerza na Primorskem, Slovenija) (desno).

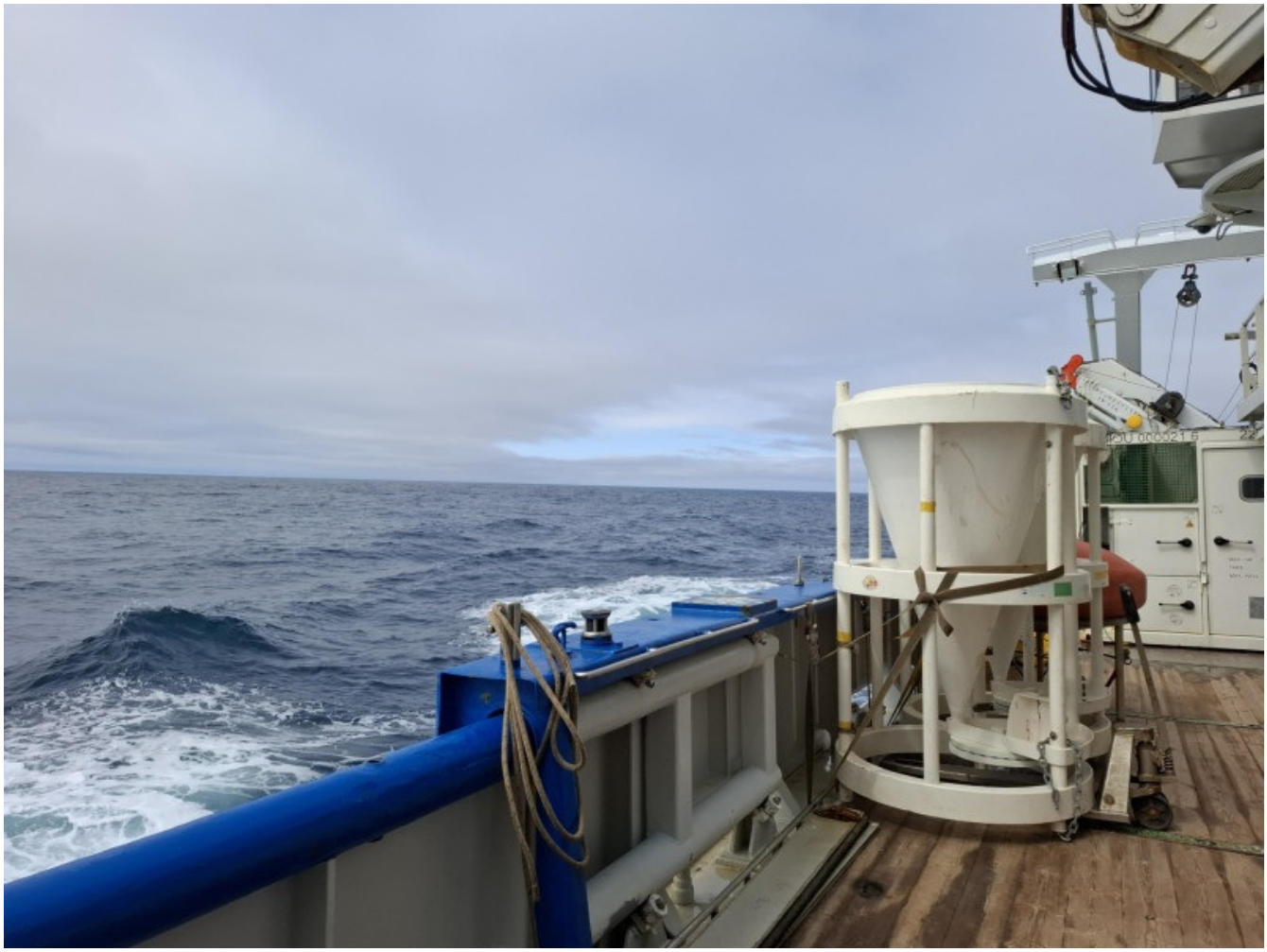
Biološko popotovanje ogljika po oceanih se začne s fitoplanktonom, ki v dobro osvetljenem površinskem sloju oceanov (zgornjih 200 m) izvaja fotosintezo in za to potrebuje raztopljen ogljikov dioksid, ki pride iz ozračja. Pretvori ga v organsko snov, ki se vgradi v njegovo biomaso. Nato se po prehranjevalni mreži pretaka prek manjšega in večjega zooplanktona do drugih organizmov višjih trofičnih ravni, denimo rib in sesalcev. Večji del te organske snovi se v procesu dihanja pretvori nazaj v $CO_2$, ki se sprosti v vodo, kjer postane del raztopljenega anorganskega ogljika. Če se to zgodi blizu površine, se lahko ta ogljik hitreje vrne nazaj v atmosfero. Prek različnih poti, med drugim pri izločanju neabsorbirane hrane in ob smrti organizmov, pa se manjši del organske snovi izloči v obliki manjših delcev raztopljene in večjih delcev partikulatne organske snovi. Ločnica med obema ni naravna, temveč operativna, saj temelji na velikosti por filtrov, uporabljenih pri vzorčenju organske snovi (najpogosteje 0,2, 0,45 ali 0,8 µm), pri čemer je izbira filtra odvisna od konkretnega raziskovalnega vprašanja. Pod raztopljeno organsko snov uvrščamo delce, ki prehajajo skozi uporabljeni filter, medtem ko delce, zadržane na filtru, uvrščamo med partikulatno organsko snov (Slika 2). Raztopljena organska snov je običajno lažje dostopna mikroorganizmom, ki jo razgradijo nazaj do osnovnih gradnikov, tj. anorganskih hranil, že v zgornjih plasteh oceana. Na ta način ponovno postane dostopna fitoplanktonu, ki ta hranila potrebuje za svojo rast. Po drugi strani pa delci, ki sestavljajo partikulatno organsko snov, zaradi gravitacije potonejo v globlje sloje oceanov, včasih celo do morskega dna. Količina snovi, ki doseže določeno oceansko globino, je odvisna od tamkajšnjega morskega okolja, denimo lokalne temperature in prehranjevalne mreže, ki med drugim določata hitrost razgradnje. Tako kot pri raztopljeni organski snovi tudi pri procesu razgradnje partikulatne organske snovi odigrajo pomembno vlogo mikroorganizmi, saj jo pretvorijo v raztopljeno organsko snov in nato do osnovnih gradnikov, ki jih na ta način vračajo v prehranjevalni splet. Ob mikrobni razgradnji organske snovi v procesu dihanja nastaja tudi $CO_2$, ki se z vertikalnimi tokovi ponovno dvigne proti površju in se lahko vrne v ozračje. Del ogljika se lahko porabi za izgradnjo mikrobne biomase in tako ostane v morju. Določena količina partikulatne in raztopljene snovi pa je tudi mikroorganizmom težje dostopna in razgradljiva – če se nahaja dovolj globoko v oceanu, kjer so tudi globokomorski tokovi bolj šibki, lahko v njem ostane ujeta na tisoče let, s čimer oceani blažijo podnebne spremembe.




Slika 2: Shema filtracije organske snovi na raztopljeno in partikulatno organsko snov. Avtorica sheme: doc. dr. Tinkara Tinta (NIB, Slovenija).

**Neskladje med koncentracijami ogljika in mikrobno aktivnostjo**

Meritve koncentracije partikulatnega ogljika se v oceanih izvajajo večinoma s sedimentnimi pastmi (https://en.wikipedia.org/wiki/Sediment_trap) (Slika 3). To so stožčaste naprave, s katerimi raziskovalci lovijo snov, ki potone do določene globine. Znanstveniki lahko vzporedno izvajajo tudi meritve mikrobne aktivnosti, ki je omejena s količino in sestavo razpoložljive organske snovi, anorganskih hranil ter ostalih okolijskih dejavnikov, kot sta na primer temperatura in tlak. Težava je, da meritve mikrobne aktivnosti kažejo, da bi morala biti količina organske snovi v globinah oceanov veliko večja od izmerjene količine, zbrane s sedimentnimi pastmi. Ena od možnih razlag je, da dosedanje meritve količine ogljika ne vključujejo nekaterih pomembnih virov in mehanizmov transporta. Po drugi strani so lahko meritve mikrobne aktivnosti zaradi določenih eksperimentalnih pomanjkljivosti precenjene. Vsekakor je v procesih biološke ogljične črpalke ogromno neznanega.



1 / 3

Slika 3: Spust sedimentne pasti na krovu raziskovalne ladje Pelagia Kraljevega nizozemskega inštituta za raziskave morja (NIOZ) med odpravo NEREIDES pod vodstvom prof. dr. Gerharda J. Herndla, Univerza na Dunaju, Avstrija. Foto: doc. dr. Tinkara Tinta (NIB, Slovenija).



2 / 3

Slika 4: Delo v laboratoriju za meritve mikrobne metabolne aktivnosti s pomočjo spojin, označenih z radioaktivnimi izotopi, na krovu raziskovalne ladje Pelagia Kraljevega nizozemskega inštituta za raziskave morja (NIOZ) med odpravo NEREIDES pod vodstvom prof. dr. Gerharda J. Herndla, Univerza na Dunaju, Avstrija. Foto: doc. dr. Tinkara Tinta (NIB, Slovenija).



3 / 3

Slika 5: Spust rozete (naprave, ki zajame okoljsko vodo na različnih globinah) na krovu ladje Pelagia Kraljevega nizozemskega inštituta za raziskave morja (NIOZ) med odpravo NEREIDES pod vodstvom prof. dr. Gerharda J. Herndla, Univerza na Dunaju, Avstrija. Foto: doc. dr. Tinkara Tinta (NIB, Slovenija).

V zadnjem času so znanstveniki začeli preiskovati potencialno vlogo želatinoznega zooplanktona kot dodatnega vira ogljika in vlogo teh organizmov pri prenosu organske snovi s površja v globine oceanov (Slika 1). Med želatinozni zooplankton (https://en.wikipedia.org/wiki/Gelatinous_zooplankton) primarno štejemo predstavnike iz debel Cnidaria (ožigalkarske meduze), Ctenophora (rebrače) in Chordata (salpe), po navadi pa vse skupaj imenujemo kar meduze. Meduze zaznamuje krhko in pogosto skoraj prosojno telo, zmožnost masovnega pojavljanja in visoko letno skladiščenje ogljika v njihovi biomasi. Po trenutnih ocenah ta znaša približno 10 % globalne primarne produkcije, čeprav so novejše raziskave, ki so uporabile bolj sofisticirane modele, pokazale, da je vrednost verjetno precej nižja. Različne študije so na podlagi manjšega števila eksperimentalnih meritev predpostavljale, da odmrle meduze potonejo hitreje kot drugi toneči delci organske snovi (lahko tudi dobrih 1000 m/d) in zato vse do morskega dna ohranijo znaten del svoje začetne biomase. Zato predstavljajo pomemben vir in vektor prenosa ogljika v globoko morje. Ravno zaradi svoje velikosti pa se večinoma ne ujamejo v sedimentne pasti in zato najverjetneje niso upoštevane v meritvah.

Z uporabo matematično-eksperimentalnih modelov so znanstveniki izračunali, da toneča trupla meduz na poti do morskega dna zaradi mikrobne razgradnje izgubijo približno dve tretjini svoje mase in da do dna pride le kaka tretjina odmrle meduzne biomase – in s tem tudi ustrezno majhen del ogljika. Ti modeli so bili konceptualno nekoliko pomanjkljivi, saj niso upoštevali dveh pomembnih okoliščin. Prvič, osnovna fizika narekuje, da se mora hitrost tonjenja manjšati z maso tonečega delca – ko se truplo zaradi razpadanja manjša, se mora obenem upočasnjevati. Na primer pri 20° C bi meduza izgubila približno 10 % svoje mase, zaradi česar bi se upočasnila za približno 2 %. In drugič, ti modeli so predpostavljali, da je hitrost razpadanja meduze odvisna od njihove trenutne mase. Vendar to verjetno ni najbolj trdna predpostavka: mikrobi se pri razgradnji namreč pritrdijo na površino delca meduze, zato utegne biti razpad meduz prej sorazmeren s površino meduze kot z njeno maso.

**Nov model tonjenja in razpada meduz**

Obstoječe modele smo zato v nedavno objavljeni študiji (https://doi.org/10.1029/2025GB008937) razširili tako, da smo upoštevali gornja popravka. Za toneče delce meduz smo izpeljali nov matematično-fizikalni model, v katerem se hitrost tonjenja meduz vselej zmanjšuje, medtem ko razpadajo. Modelski opis tega razpada smo prilagodili tako, da je hitrost

razpada odvisna od površine namesto od mase meduze.

Ugotovili smo, da vpeljava teh modelskih sprememb občutno zmanjša globalno oceno prenosa ogljika, shranjenega v truplih meduz, s površine na morsko dno. V primerjavi s prejšnjimi študijami (https://doi.org/10.1029/2020GB006704) je v naši raziskavi morsko dno doseglo 43 % manj takšnega partikulatnega ogljika. Da bo globokomorski izkupiček ogljika manjši, smo predvidevali že pred izvedbo simulacij. Delci se namreč ob razpadu manjšajo in tako tudi vse počasneje tonejo, zato potrebujejo več časa, da dosežejo morsko dno. Prav zato so tudi dalj časa izpostavljeni morskim mikrobom, ki lahko posledično delce meduz dalj časa razgrajujejo.

Če je hitrost razpada večja, je odstopanje v našem modelu toliko bolj očitno. Zato je do največjih razlik pričakovano prišlo v toplejših tropskih morjih, kjer je mikrobna aktivnost zaradi višjih temperatur višja in se zaradi hitrejše razgradnje tudi tonjenje meduz hitreje upočasni. V hladnih polarnih morjih je bila zato razlika med modeli manj izražena. Tam je bil namreč zaradi nižjih temperatur razpad tako počasen, da so se delci meduz med tonjenjem zanemarljivo upočasnili.

Podobno je do največjih relativnih razlik v količini meduzne mase – in v njih shranjenega ogljika – prišlo med delci, ki so imeli že na samem začetku nižje hitrosti tonjenja. To je smiselno, saj so ti delci potrebovali več časa, da so potonili pod površinske sloje oceanov, v katerih so temperature v splošnem višje. Tako so bili posledično dalj časa izpostavljeni višji mikrobni razgradnji in so zato hitreje izgubili večji del svoje začetne mase.

Nazadnje smo pokazali, da se ob upoštevanju zgornjih modelskih popravkov relativna razlika v količini meduzne mase povečuje z globino. Z drugimi besedami, vpliv spremenljive vertikalne hitrosti tonjenja in površinsko pogojenega razpada se akumulira skozi celoten proces tonjenja in je zato najbolj opazen na morskem dnu. Tako smo zaključili, da meduze sicer predstavljajo pomemben vir in vektor prenosa ogljika s površja v globine oceanov, vendar je prenos v globoko morje (pod 1000 m globine) manjši od prejšnjih ocen.

Zaradi podnebnih sprememb bodo morda ti organizmi v toplejših morjih v prihodnosti hitreje razpadali, morda pa se bo v svetovnih morjih spremenila tudi njihova porazdelitev. Zaradi njihove izjemne prilagodljivosti na spremembe v okolju se prav za predstavnike želatinoznega zooplanktona predvideva, da bodo zmagovalci oceanov prihodnosti. Hitrejši razpad lahko pomeni, da bodo v večji meri razpadli v površinski plasti morja, zato bo več ogljika ostalo blizu površja. Tam bo tako na voljo za prenos na druge trofične ravni ali pa za hitro vrnitev v atmosfero v obliki $CO_2$. S toplejšimi oceani bi torej lahko oslabel tudi eden od pomembnejših mehanizmov, ki nam danes pomaga nižati koncentracije ogljika v atmosferi. Po trenutnih ocenah namreč mehanizem biološke ogljične črpalke uskladišči v globokem morju kar okoli 30 % $CO_2$, ki ga v ozračje izpusti človeštvo. Modeli, kot je naš, bodo zato v prihodnosti predstavljali ključna orodja za napovedovanje ocen kroženja ogljika med atmosfero in oceani.

**Kako naprej?**

Model, ki smo ga razvili, seveda ni popoln in dopušča mnoge razširitve. V njem na primer ni upoštevano, da lahko v resničnem oceanu odmrle meduze med njihovim tonjenjem razgradijo ali raztrgajo mrhovinarji ali pa da lahko meduzna trupla razpadajo na manjše delce, ki tonejo počasneje. Prav tako na njihov razpad zelo verjetno vplivajo še drugi okoljski dejavniki, ne le temperatura. A tovrstne razširitve niso smiselne, dokler so zahtevani parametri modela slabo eksperimentalno določeni. Z vključitvijo novih parametrov, katerih vrednosti ne poznamo dobro, bi sicer povečali kompleksnost modelskih procesov, ampak bi v isti sapi povečali tudi negotovost modelskih napovedi. V takih razmerah je zato treba nove parametre uvajati zelo previdno. Prav to je morda eden najlepših vidikov modela, ki smo ga razvili. V njem nismo uvedli nobenega novega parametra, ki bi dodatno prispeval k negotovosti rezultata, saj nam je uspelo vse modelske novosti zgraditi s predhodno znanimi vhodnimi podatki. Ker so že ti osnovni podatki obremenjeni z veliko negotovostmi, moramo v prihodnosti posvetiti več pozornosti eksperimentalnemu delu, ki bo pomagalo razumeti procese razgradnje meduz. Najnujneje pa se je treba posvetiti vzorčenju in opazovanju meduznih populacij (Sliki 4 in 5), med drugim tudi v globokem oceanu, saj bomo lahko le na tovrstnih eksperimentalnih temeljih razvili kompleksnejše in zanesljivejše teoretične modele.