

Rádionuklidové stopovače odhaľujú zmeny v Tichom oceáne spôsobené klimatickou zmenou

14.9.2026 - | Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta managementu

Výskum antropogénnych rádionuklidov v Tichom oceáne a jeho okrajových moriach prináša nové dôkazy o zmenách súvisiacich s dôsledkami klimatickej zmeny.

Globálne otepľovanie ovplyvňuje základné procesy v celom systéme Zeme. Zmeny v režime zrážok, častejšie prívalové povodne, suchá a lesné požiare, ako aj topenie ľadovcov ovplyvnilo procesy na Zemi vrátane zvyšovania hladiny oceánov a zmien v oceánskom uhlíkovom cykle. Zároveň oceány čelia častým vlnám horúčav, ktoré majú dôsledky pre biogeochemické procesy, acidifikáciu povrchových vôd, biodiverzitu a migráciu morských organizmov smerom k pólom. Antropogénne rádionuklidy, ako sú ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs a izotopy plutónia, predstavujú mimoriadne cenné nástroje na skúmanie týchto zmien. Do morského prostredia sa dostali najmä v dôsledku atmosférických skúšok jadrových zbraní uskutočňovaných od roku 1945 (globálny spad) a môžu slúžiť ako citlivé, časovo rozlíšené stopovače procesov prebiehajúcich v oceáne. Vďaka dobre zdokumentovanej histórii ich vstupov do morského prostredia a v prípade niektorých rádionuklidov aj prevažne konzervatívnemu správaniu sa v morskej vode, predstavujú účinné časové markery na štúdium tvorby, transportu a vertikálnej výmeny vodných mäs. Merania ich distribúcie v morskej vode, v sedimentoch a morských organizmoch preto môžu poskytovať informácie o zmenách v cirkulácii oceánov a stratifikácii morských vôd vyvolaných klimatickou zmenou.

Tichý oceán, najväčšia oceánska panva na Zemi, je už niekoľko desaťročí predmetom rozsiahleho výskumu antropogénnych rádionuklidov. Tento jedinečný súbor dlhodobých pozorovaní z neho robí významné prírodné laboratórium na skúmanie vplyvov klimatickej zmeny na morské prostredie. Analýzy ^3H a ^{137}Cs v morskej vode napríklad zdokumentovali zmeny vo ventilačných a transportných procesoch v horných vrstvách oceánu v priebehu niekoľkých desaťročí, vrátane zmien súvisiacich so spomaľovaním cirkulácie medzi jednotlivými časťami oceánu. Izotopy plutónia poskytli doplňujúce informácie o procesoch prebiehajúcich vo vodnom stĺpci. Tieto pozorovania pomohli odhadnúť zmeny v morských biogeochemických procesoch a možných dôsledkov pre účinnosť ukladania uhlíka v oceáne. Pomery izotopov plutónia namerané v sedimentoch Indonézskych morí poskytli dôkazy o oslabovaní transportu povrchových vôd zo západnej tropickej časti severného Tichého oceánu cez Indonézske moria do Indického oceánu. Súhrnne rádionuklidové pozorovania poskytujú obraz, ktorý je vo všeobecnosti v súlade s otepľovaním oceánu a rastúcou stratifikáciou jeho horných vrstiev. Silnejšia stratifikácia môže obmedzovať vertikálnu výmenu a ovplyvňovať prepojenie medzi jednotlivými oceánskymi panvami, čo môže mať dôsledky pre globálnu meridionálnu cirkuláciu medzi oceánmi ako aj globálnu redistribúciu tepla, uhlíka, živín a ďalších látok. Japonské more predstavuje mimoriadne zaujímavý príklad. Nárast teploty povrchovej morskej vody pozorovaný v posledných desaťročiach sprevádza oslabenie zimnej konvekcie, podpovrchové teplotné anomálie a epizodické morské vlny horúčav. Zmeny aktivity cyklonálnych a anticyklonálnych vírov ovplyvnili recirkuláciu spodných vôd smerom k povrchu, čo môže mať významné dôsledky pre morské ekosystémy a rybolov. Na druhej strane, rádionuklidové záznamy z Juhočínskeho mora odrážajú variabilitu spojenú s ázijskými monzúnovými systémami a javmi El Niño – Južná oscilácia (ENSO), čím poukazujú na význam rádionuklidových stopovačov pri skúmaní interakcií medzi oceánom a klimatickým systémom.

Dlhodobý výskum antropogénnych rádionuklidov má preto veľký potenciál zlepšiť naše chápanie

súčasných a budúcich vplyvov zmeny klímy na svetový oceán a priľahlé moria, pretože môže poskytnúť nezávislé, na pozorovaní založené zmeny v ich cirkulácii, ktoré je ťažké vyriešiť iba fyzikálnymi meraniami. Súborný údajov o morských rádionuklidoch vrátane údajov uložených v Marine Radioactivity Information System (MARIS; <https://maris.iaea.org>) Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu predstavujú tiež cenné referenčné údaje na kalibráciu a validáciu všeobecných modelov oceánskej cirkulácie (Ocean General Circulation Models, Earth System Models), ktoré sa využívajú pri skúmaní budúcich klimatických scenárov. Ďalší pokrok si bude vyžadovať koordinované medzinárodné programy odberu vzoriek s vysokým priestorovým a hĺbkovým rozlíšením pokrývajúce svetový oceán v kombinácii s pokročilými ultracitlivými analytickými metódami, ako sú urýchľovačová hmotnostná spektrometria a nízkopozadová gama spektrometria. Tieto metódy umožňujú analyzovať menšie vzorky morskej vody, sedimentov a koralov a zároveň získavať rádionuklidové profily s vyšším rozlíšením. Osobitnú pozornosť je potrebné venovať Južnému oceánu vzhľadom na jeho kľúčovú úlohu v globálnom klimatickom systéme a relatívny nedostatok komplexných rádionuklidových pozorovaní v tejto oblasti.

Výsledky týchto výskumov boli nedávno publikované v časopisoch *Communications Earth & Environment* (Nature Portfolio) a *Journal of Environmental Radioactivity* (Elsevier):

Pavel P. Povinec, Katsumi Hirose, Gi-Hoon Hong, Xiaolin Hou, Yayoi Inomata, Jakub Kaizer, and Daisuke Tsumune. Anthropogenic radionuclides as tracers of climate change in the Pacific Ocean. *Communications Earth & Environment* **7** (2026), 427.
<https://doi.org/10.1038/s43247-026-03639-0>

P. P. Povinec, K. Hirose, G. H. Hong, X. Hou, Y. Inomata, J. Kaizer, D. Tsumune, and X. Zhao. Marine radionuclides in climate change studies: Pacific Ocean and marginal seas. *Journal of Environmental Radioactivity* **298** (2026), 108022.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2026.108022>

Popisy obrázkov:

Obr. 1: Globálna meridionálna cirkulácia oceánov (Global Meridional Overturning Circulation), niekedy označovaná aj ako globálny oceánsky dopravníkový pás, je rozsiahly cirkulačný systém, ktorý prepája povrchové a hlboké vody jednotlivých oceánskych paniev. Prostredníctvom Južného oceánu prepája cirkuláciu v Atlantickom, Indickom, Tichom a Severnom ľadovom oceáne a zabezpečuje redistribúciu tepla, uhlíka, sladkej vody a živín. Táto cirkulácia prebieha v časových intervaloch od desaťročí až po tisícročia. Keďže prúdenie je pomalé a mení sa v časovom horizonte niekoľkých desaťročí, nezávislé stopovače, ako sú antropogénne rádionuklidy, sú cenným nástrojom na určovanie zmien jeho dráh a intenzity. Typické rýchlosti prúdenia sú nízke (~1 cm/s), ale celkový objem transportovanej vody je obrovský a výrazne ovplyvňuje regionálnu klímu, hladinu morí a morské ekosystémy. Transport tepla smerom na sever v Atlantiku vrátane systému Golfského prúdu významne prispieva k relatívne miernej klíme severozápadnej Európy.

Obr. 2: Profily ^{137}Cs v južnej časti Tichého oceánu (30° j. š.), Indického oceánu (20° j. š.) a Atlantického oceánu (30° j. š.) boli získané počas expedície BEAGLE (Blue Ocean Global Expedition) a predstavujú prvé mapovanie naprieč svetovým oceánom. V Indickom oceáne boli pozorované výrazné podpovrchové maximá v hĺbkach približne 100 – 200 m, najmä v okolí 100° a 55° v. d. Tieto maximá možno vysvetliť transportom povrchových vôd zo severnej časti Tichého oceánu cez Indonézske moria do južnej časti Indického oceánu, kde subtropický oceánsky vír pôsobí ako dlhodobý rezervoár antropogénnych kontaminantov. Pozorovania poskytujú ďalšie informácie o prepojení Tichého, Indického a Atlantického oceánu v rámci širšieho systému globálnej meridionálnej cirkulácie vody v oceánoch.

https://www.fm.uniba.sk/detail-aktuality/back_to_page/aktuality-35/article/radionuklidove-stopovace-odhaluju-zmeny-v-tichom-oceane-sposobene-klimatickou-zmenou