ALTERNATOR
Misliti znanost.

Izotopi – neizbrisljiv prstni odtis

20. 8. 2026

Number: 31/2026

Authors:

- Jan Gačnik
- Polona Vreča



Ilustracija: Izar Lunaček

© Izar Lunaček 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.

Detektiv Hercule Poirot vstopi na prizorišče zločina. Tokrat ima opravka s pretkanim zločincem: znakov orožja ni, stopinje in prstni odtisi so zabrisani. V knjigah bi gospod Poirot s svojo sistematičnostjo in logiko naposled le odkril luknjo v obrambi zločinca, s čim pa bi si pomagal novodobni detektiv? Na pomoč bi mu lahko priskočila analiza izotopske sestave blata s čevljev zločinca ali majhnih ostankov streliva. Novodobni detektivi lahko na podlagi take analize dokaznega gradiva ugotovijo, ali je bil osumljenec prisoten na kraju zločina ali ne, to pa je le eden izmed mnogih primerov uporabe analize izotopske sestave, s katero dobimo prstni odtis, ki ga je težko prikriti.

Izotopi so s kemijskega vidika atomi istega elementa z različno maso ali, z drugimi besedami, različice elementa z istim številom protonov in različnim številom nevtronov. Teh različic elementov je v naravi veliko; kositer, na primer, je rekorder s kar desetimi naravnimi izotopi. Nekateri elementi imajo poleg stabilnih izotopov, ki predstavljajo veliko večino vseh naravnih izotopov, tudi naravno prisotne radioaktivne izotope. Dobro znan primer je uran, ki ima dva naravno prisotna radioaktivna izotopa, stabilnega pa nobenega. Izraz *radioaktivni izotop* lahko zaradi povezav z jedrskimi nesrečami vzbudi negotovost in strah, čeprav so radioaktivni in stabilni izotopi nekaj naravnega in nas v okolju, kjer živimo, obkrožajo že od nekdaj. Tudi najpomembnejša molekula okrog in v nas, voda, je sestavljena iz dveh atomov vodika in

enega atoma kisika, vsak atom vodika in kisika pa lahko obstaja v treh različnih naravnih izotopih, tudi radioaktivnih. Posledično vsebuje kozarec vode množico molekul vode z različnimi kombinacijami izotopov vodika in kisika. Ena od teh kombinacij, ko molekula vode vsebuje kisik in dva težja stabilna izotopa vodika, imenovana devterij, je poznana pod poljudnim imenom *težka voda*. Molekule vode z različno maso se v določenih fizikalnih procesih obnašajo nekoliko drugače, saj v nekaterih procesih hitreje reagirajo molekule s težjimi izotopi, v drugih pa tiste z lažjimi. Ta pojav imenujemo *izotopska frakcionacija*, zaradi nje pa lahko iz izmerjene izotopske sestave dobimo vpogled v zgodovino našega vzorca.

Zakaj in v katerih procesih pride do izotopske frakcionacije oziroma do drugačnega vedenja težke vode? Težka voda ima nekoliko večjo maso od običajne, zato ima višjo temperaturo vrelišča, saj potrebuje nekaj več energije, da bi izhlapela v plinasto fazo (fizikalni mehanizem frakcionacije). Hkrati pa so kemijske vezi med molekulami težke vode malce močnejše, zaradi česar potrebujejo dodatno energijo za izhlapevanje (kemijski mehanizem frakcionacije). Čez čas posledično v tekoči fazi ostane več težkih molekul vode, medtem ko v plinasto fazo izhlapi več lahkih molekul vode. Tudi transpiracija rastlin, pri kateri iz listov izhlapeva voda z namenom ohlajanja in transporta hranil, povzroči izotopsko frakcionacijo vode. Med transpiracijo iz listnih rež rastlin izhlapeva voda, pri tem preko prej opisanega mehanizma pride do prednostnega izhlapevanja lahkih izotopov, v listu pa ostane več težjih izotopov (biološki mehanizem frakcionacije). Posledično ima voda v listih rastlin v povprečju drugačno izotopsko sestavo z več težkimi izotopi kisika in vodika kot voda v njihovih koreninah. Zaradi opisanih procesov frakcionacije imajo tudi različni vodni rezervoarji v hidrološkem ciklu različno izotopsko sestavo vode. V grobem imajo na primer oceani zaradi velike mere izhlapevanja značilno več molekul vode s težkimi izotopi, medtem ko je pri podzemni vodi izhlapevanja manj, zato je ta v primerjavi z oceansko izotopsko lažja.

Led je le voda v trdnem agregatnem stanju, ki se lahko nalaga različno dolgo, na polarnih ledenih kapah tudi milijone let. Znanstveniki z globokimi vrtinami in odvzemom ledenih jeder pridobivajo podatke o preteklih klimatskih pogojih. Tako so izotopske raziskave vzorcev ledenih jeder z Antarktike in Grenlandije (https://doi.org/10.1029/97JC01283) omogočile vpogled v spreminjanje temperature zraka na Zemlji celo več sto tisoč let v preteklost. Kako je taka rekonstrukcija temperature sploh mogoča? Led nastane iz padavin, katerih izotopska sestava kisika in vodika je v veliki meri odvisna od temperature zraka. V času višjih temperatur je namreč več izhlapevanja padavin, zato imajo dežne kapljice sorazmerno več molekul s težkimi izotopi kisika in vodika. Te razlike v izotopski sestavi se skozi čas beležijo v zaporednih plasteh ledu, ki postopoma nastajajo z nalaganjem snežnih padavin. Bolj kot je vrtina globoka, starejši je led, njegovo starost pa lahko ocenimo s pomočjo vidnih mej med leti ter kemijskimi analizami raztopljenih snovi v ledu, prašnih delcev in mehurčkov zraka, ujetih v njem. Slojem ledu se tako pripiše starost ter kemijsko in tudi izotopsko sestavo. Ker dandanes poznamo odvisnost med temperaturo zraka ter izotopsko sestavo kisika in vodika v padavinah, lahko na osnovi poznavanja izmerjene izotopske sestave ledu sklepamo, kolikšna je bila temperatura zraka v preteklosti.

Padavine so sestavni del vodnega kroga in predstavljajo primarni vir površinskih in podzemnih voda. Slednje so v Sloveniji tudi glavni vir pitne vode. S tem, ko izmerimo izotopsko sestavo vode v vzorcu padavin in preostalih komponentah vodnega kroga, lahko odgovorimo na različna vprašanja, povezana s kroženjem vode ali vodnim krogom: od kod izvira zračna vlaga, iz katere nastanejo padavine – iz Sredozemskega morja ali Atlantskega oceana? Kako se sestava padavin spreminja sezonsko, skozi leta in stoletja? Kakšen je odziv izotopske sestave padavin na podnebne spremembe? Kako padavine vplivajo na vodni krog? Kako se na spremembe odzivajo naši vodni viri, površinske in tudi podzemne vode? In še na mnoga druga. Nekaj primerov informacij in odgovorov na navedena vprašanja (na osnovi poznavanja izotopske sestave vode v kombinaciji z meteorološkimi in hidrološkimi podatki) je shematsko prikazanih na

spodnji sliki, in sicer za različna območja, pomembna za vodooskrbo v Sloveniji.

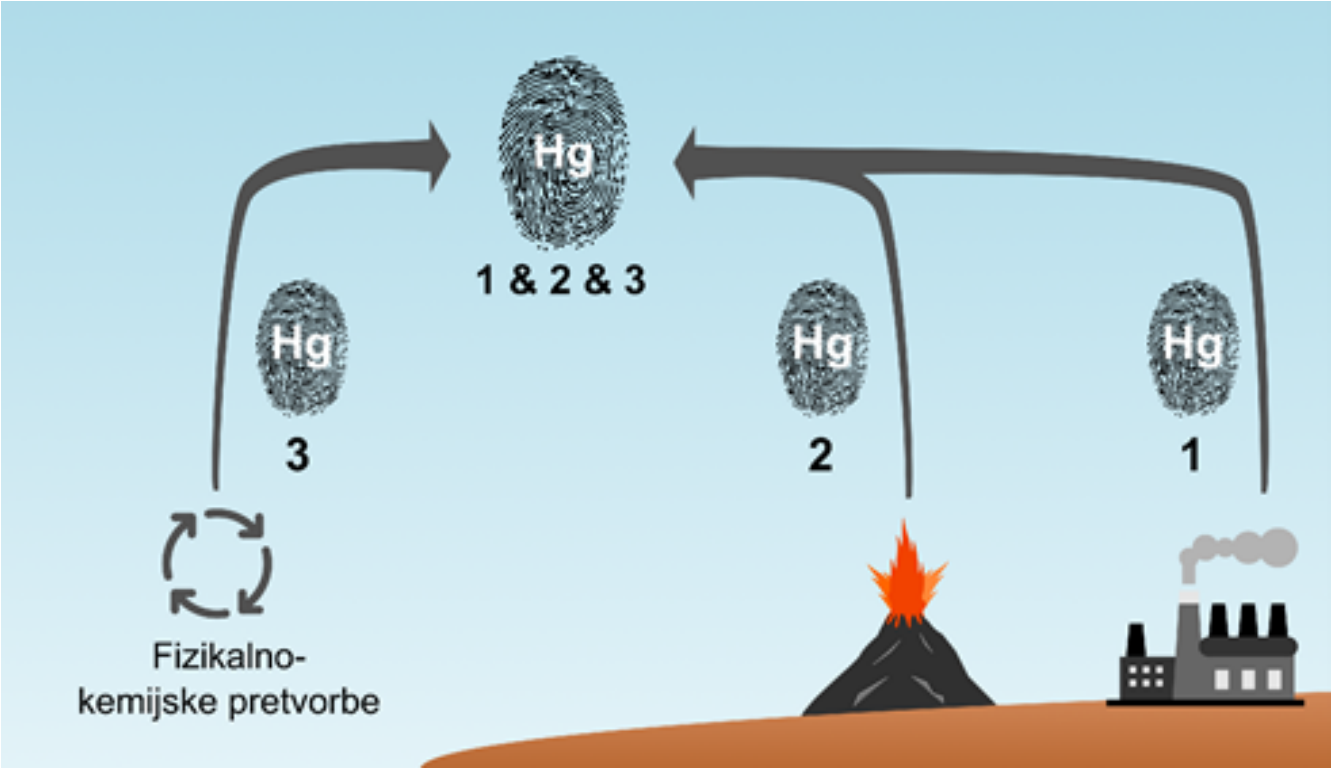


Slika 1: Trije različni hidrološki sistemi v Sloveniji in informacije, ki jih lahko pridobimo z izotopskimi meritvami vode. Ohranjenost prstnih odtisov simbolno prikazuje stopnjo ohranjenosti prvotne izotopske sestave padavin, ki napajajo navedena porečja in vodonosnike. Ohranjenost izotopske sestave padavin je odvisna predvsem od časa zadrževanja, mešanja vode iz različnih virov in obsega izhlapevanja. Vir slik: Wikimedia Commons (avtorja Marco Bonomo (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marmolada,_Italy.jpg) in Jakub Hałun (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%C5%A0kocjan_Caves,_Slovenia,_20240502_1235_7601.jpg)) ter Krajinski park Ljubljansko barje (https://www.naravniparkislovenije.si/slo/naravni-parki/krajinski-park-ljubljansko-barje) .

Na ta vprašanja poskušamo odgovarjati tudi na Odseku za znanosti o okolju Instituta "Jožef Stefan". Ker se padavine v Sloveniji v času in prostoru znatno spreminjajo tako po količini kot tudi izotopski sestavi, smo vzpostavili raziskovalno mrežo SLONIP (https://slonip.ijs.si) , v okviru katere na mesečni ravni zbiramo podatke o izotopski sestavi padavin. Število opazovalnih lokacij se s časom spreminja, predvsem v odvisnosti od virov financiranja. Trenutno izvajamo raziskave na sedmih postajah, na nekaterih izmed njih že več desetletij. V nedavni raziskavi (https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123286) smo se posvetili rezultatom, pridobljenim v Ljubljani, kjer je niz podatkov dolg kar 44 let. Ugotovili smo, da je naraščajoča temperatura zraka v Ljubljani in na širšem območju Srednje Evrope glavni dejavnik spremembe izotopske sestave padavin skozi desetletja. Zaradi podnebnih sprememb se povprečna letna temperatura zraka v Ljubljani vztrajno dviguje, kar se v zadnjih dveh desetletjih jasno odraža tudi v izotopski sestavi padavin. Višje temperature namreč po prej opisanem mehanizmu povečajo obseg izhlapevanja padavin, kar se v izotopski sestavi padavin odraža z večjim deležem molekul vode s težjimi izotopi kisika in vodika. Posledično prihaja do sprememb tudi v izotopski sestavi površinskih in podzemnih vod, kjer pa je izotopski odtis prvotnih padavin zaradi drugih vplivov in procesov že znatno zabrisan. Razumevanje prerazporejanja vode znotraj vodnega kroga ostaja izziv za okoljske detektive, sistematično spremljanje izotopske sestave vode pa jim pri tem zelo pomaga.

Če smo se do zdaj osredotočali na vodni krog, pa lahko z izotopi določimo tudi vire različnih kemijskih onesnažil, na primer živega srebra, ki je zdravju škodljiv nevrotoksin. Nekatere spojine živega srebra se v človeškem telesu kopičijo vse življenje. Ljudje smo z izpusti živega srebra močno povišali njegovo količino v zraku in okolju. Primer takih izpustov so izgorevanje premoga in drugih fosilnih goriv, rudarjenje zlata s pomočjo živega srebra, izpusti cementarn ter uporaba živega srebra v elektrolitskih celicah za proizvajanje

klora in natrijevega hidroksida. A vendar je živo srebro v zraku prisotno tudi iz naravnih virov, kot so vulkani in geotermični viri. V novi raziskavi (https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118257) smo ugotovili, da lahko izotopi živega srebra v zraku razkrijejo njegov izvor. Izpusti živega srebra, ki nastajajo pri sežigu fosilnih goriv v elektrarnah in cementarnah, imajo namreč relativno manj težkih izotopov v primerjavi z naravnimi izpusti. Ta pojav je posledica procesov pri izgorevanju, pri katerem lažji izotopi živega srebra prednostno prehajajo v plinasto fazo, težji pa ostajajo v trdnem in neizgorelem ostanku goriva. Ker imajo tudi različne vrste goriva različno izotopsko sestavo živega srebra, je mogoče med posameznimi viri emisij tudi ločevati, na primer med izpusti cementarn in termoelektrarn. Slednje večinoma uporabljajo premog, medtem ko cementarne vse pogosteje uporabljajo alternativna goriva, kot so odpadne gume in drugi odpadni materiali. Takšne informacije o virih emisij so izredno pomembne za znanstveno podporo političnim odločitvam, ki so namenjene zaščiti človeškega zdravja in okolja pred negativnimi učinki onesnaženja z živim srebrom. Primer take politične odločitve je bila nedavna popolna prepoved (https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/minamata-convention-cop-6-agrees-end-use-dental-amalgam-2034) uporabe živosrebrnih amalgamov za zobne zalivke do leta 2034, ki jo je sprejel odbor Minamatske konvencije (https://minamataconvention.org/en/about) , katere država članica je tudi Slovenija. Minamatska konvencija si prizadeva zmanjšati človeške vplive na onesnaženje okolja z živim srebrom, saj smo po industrijski revoluciji od leta 1850 v okolje sprostili več kot 1,5 milijona ton živega srebra (https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00451) .



Slika 2: Živo srebro (Hg) in prispevki k njegovi izotopski sestavi v zraku (povzeto po Gačnik idr. 2025 (https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118257)). Prstni odtisi simbolno prikazujejo izotopsko sestavo posameznih virov in procesov, ki prispevajo h končni izotopski sestavi živega srebra v zraku.

Ko boste torej naslednjič po televiziji gledali kriminalno serijo ali film in boste zagledali laboratorijskega tehnika, ki s pritiskom na gumb merilne naprave v trenutku razkrije ključne sledi zločina (kar v resnici seveda ne gre niti tako hitro niti tako preprosto), se boste morda spomnili, kaj se skriva v ozadju – izotopi. Ti pa presegajo zgolj kriminalistično forenziko, pomagajo nam tudi pri iskanju informacij o izvoru in kroženju

vode, virih onesnažil v okolju ter še mnogo več. Z meritvami izotopov vode smo na primer ugotovili, da naraščajoče povprečne letne temperature v Sloveniji vplivajo tudi na padavine in procese njihovega nastajanja. To lahko v prihodnosti vpliva na kakovost podzemne vode, ki jo danes pogosto jemljemo kot samoumevno. Podobno nam izotopi živega srebra omogočajo ugotavljanje njegovega izvora v zraku, ki ga dihamo – ali izvira iz cementarn, termoelektrarn ali celo vulkanskih izbruhov. Izotopi so tako postali sodobno detektivsko orodje, ne le v rokah forenzikov, temveč tudi znanstvenikov, ki si prizadevajo za bolj zdravo in varno okolje. Z napredkom metod in znanja o izotopih bo v prihodnosti mogoče še natančnejše sledenje virom onesnaženja in boljše razumevanje okoljskih procesov, zlasti v povezavi s podnebnimi spremembami in človeškimi vplivi nanje.

* Prispevek je nastal v sklopu financiranja Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) preko raziskovalnih projektov AtMoMer (RSF-0073), M-CAT (J1-70023) in MultiPart (J7-60123) ter temeljnega raziskovalnega programa Kroženje snovi v okolju, snovna bilanca in modeliranje okoljskih procesov ter ocena tveganja (P1-0143).

https://www.alternator.science/en/long/izotopi-neizbrisljiv-prstni-odtis/