

Ledena jama na Velebitu izazov znanstvenicina

Nada Horvatinčić i Vlado Božić

Uvod

Prilikom istraživanja špilja i jama na području sjevernog Velebita posljednjih desetak godina, kada su u Hajdučkim i Rožanskim kukovima istražene dvije najdublje jame u Hrvatskoj, - Lukina jama (-1392 m) i Slovačka jama (-1268 m), dvije jame manje dubine - jama Patkov gušt (-553 m) i Ledena jama (-514 m), te još mnogo drugih, ustanovljeno je da se gotovo u svima, barem na ulaznim dijelovima, i usred ljeta nalazi

mного snijega i leda. Što se tiče leda posebno je zanimljiva Ledena jama u Lomskoj dulibi.

U prvim istraživanjima Ledene jame, u ljetu 1966. i 1977. ustanovljeno je da se neravno dno, promjera dvadesetak metara, nalazi na dubini od 50-60 m i da je cijelo pokriveno debelom naslagom snijega i leda (Jalžić, 1980). Uz prevjesne stijene jame bile su se stvorile lijepe plavo-zelene sige. Petnaestak godina poslije, tj.

u ljetu 1993. speleolozi su našli na sjevernoj strani jame, između njezine kamene stijene i debelog sloja leda, otvor, gore promjera oko 3 metra a desetak metara niže oko jedan metar, iz kojega je strujio topliji zrak (Božić, 1994; Jalžić, Lacković & Šmida, 1995). Spuštajući se dublje uz kamenu stijenu do dubine od oko 90 m speleolozi su mogli pratiti u ledu mala proširenja i suženja te dobro izraženu slojevitost ledenih naslaga. Takav slojevit led počinje na dubini od oko 50 m i pruža se do dubine od 90 m. To je u stvari velik ledeni čep promjera dvadesetak i dubok oko 40 m. Slojevi leda izvanredno se lijepo vide od samoga vrha čepa, gdje je led još pokriven svježim snijegom, pa do dna čepa koji leži na kamenom siparu.

Postojanje tako dubokog ledenog čepa pobudilo je razmišljanje o njegovoj starosti, jer je sigurno moralo proći mnogo godina da bi nastao. Maštu je pobudila i spoznaja da je Lomskom dulibom nekada tekao ledenjak (Bognar, Faivre & Pavelić, 1991), pa se pretpostavljalo da led u jami možda potječe iz doba kada je ledenjak bio aktivan, tj. iz ledenog doba, te da je možda star desetak tisuća godina. Ta je pretpostavka zagolicala sve članove speleološkog



Recentne ledene sige u gornjem dijelu jame

Foto: Vlado Božić



Početni dio ledenog čepa

Foto: Ešref Bajrić

logora, pa je odlučeno da se starost leda pokuša odrediti nekom znanstvenom metodom.

Uzimanje uzoraka

Članovi ekspedicije koji su se spremali za nastavak istraživanja u Lukinoj jami i Ledenoj jami, uspostavili su kontakt s Institutom "Ruđer Bošković" u Zagrebu radi suradnje na tom naumu. Dr. Nada Horvatinčić dala je detaljne upute kako i gdje treba uzeti uzorke leda te kako ih čuvati i dopremiti u Zagreb. Posebno pripremljene plastične boce dao je Institut, a speleolozi su se sami pobrinuli za pribor kojim će kopati uzorke (limena tava, sjekirica, cepin, svrdlo). U lipnju i srpnju 1995. uzeli su više uzoraka leda na raznim dubinama, kao i uzorke nekoliko grana koje su izvirivale iz leda. To su obavili Damir Lacković i Čedo Josipović iz SO PDS "Velebit", zajedno s Vladom Božićem.

Uzimanja uzoraka bilo je naročito teško u gornjem dijelu jame, na dubini od 1-7 metara ispod gornjeg ruba čepa, jer je trebalo kopati viseći na užetu. Najprije je struganjem i kopanjem trebalo odstraniti 10-20 cm leda s okomite površine, a onda kopati dublje i taj iskopani led spremati u pripremljene plastične posude. Na većim dubinama to je bilo lakše jer se moglo stajati na ledenim policama.

Istovremeno kada su uzeti uzorci leda uzet je i uzorak sige s debeloga sigastog saljeva na

zapadnom dijelu dvoranice koja se pruža prema sjeveru iz dvorane s ledom, na dubini od oko 50 m. U toj dvoranici ima lijepih kalcitnih saljeva, a uvijek i lijepih ledenih ukrasa, naročito stalagmita.

Metode mjerenja

Za određivanje starosti ledene naslage koristile su se metode koje se zasnivaju na mjerenju prirodnih radioaktivnih izotopa vodika ^3H i ugljika ^{14}C . Radioaktivni izotopi ^3H i ^{14}C kozmičkog su porijekla i dolaze iz viših slojeva atmosfere, ^{14}C u obliku ugljičnog dioksida, a ^3H kao sastavni dio molekule vode putem oborina. Na taj se način oba izotopa raspoređuju u prirodi, odnosno sastavni su dio atmosfere, hidrosfere i biosfere. Prirodna produkcija ^3H i ^{14}C uglavnom je konstantna, uz manje prirodne fluktuacije. Uslijed njihovog radioaktivnog raspada (beta radioaktivni raspad) uspostavljena je ravnotežna koncentracija ^3H i ^{14}C u atmosferi. Ljudskom djelatnošću ta je ravnoteža znatno poremećena, posebno u razdoblju intenzivnih pokusa s termonuklearnim eksplozijama krajem pedesetih i početkom šezdesetih godina dvadesetog stoljeća. U tom razdoblju koncentracija tricija u atmosferi porasla je gotovo tisuću puta, a koncentracija radiougljika je udvostručena. Od toga vremena koncentracija obaju izotopa u atmosferi postupno pada i danas je vrlo blizu razine prirodne koncentracije.

Mjerenje tricija u oborinama, te površinskim i podzemnim vodama danas ima značajnu ulogu u hidrologiji, npr. za određivanje srednjeg vremena zadržavanja vode u podzemlju, brzine cirkulacije vode, utjecaja površinske vode na podzemne vode i dr. Radiougljik ^{14}C ima važnu primjenu u arheologiji i paleontologiji za određivanje starosti nalaza (do 40.000 godina), zatim u hidrogeologiji kod određivanja starosti organskih sedimenata (treseta) i karbonatnih sedimenata (siga, sedre, jezerski sedimenti), te za određivanje vremena zadržavanja vode u podzemlju.

Kod izučavanja ledene naslage napravljena su i mjerenja omjera stabilnih izotopa vodika ($^2\text{H}/^1\text{H}$) i kisika ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Određivanje sadržaja stabilnih izotopa $^2\text{H}/^1\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ u oborinama (u našem slučaju u ledu), te u površinskim i podzemnim vodama ima korisnu primjenu u klimatološkim i hidrogeološkim istraživanjima. Koncentracija navedenih izotopa, koji su sastavni dijelovi molekule vode, variraju u prirodnim uvjetima. Uslijed temperaturnih promjena u prirodi nastaje stanovita izotopna frakcinacija izotopa kisika i vodika u oborinama, pa tako sastav izotopa $^2\text{H}/^1\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ u oborinama ovisi o: geografskoj širini, godišnjim dobima, nadmorskoj visini i o porijeklu oborina, tj. jesu li kontinentalnog ili morskog porijekla. Na temelju sadržaja kisika $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ u starim ledenim naslagama određene su paleotemperaturne promjene, odnosno razdoblja ledenih i međuledenih doba u prošlosti.

Za određivanje starosti sige koristila se izotopna metoda $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, koja se temelji na mjerenju omjera koncentracije prirodnih radioaktivnih izotopa torija (^{230}Th) i urana (^{234}U). Ti su izotopi sastavni dijelovi karbonatnih stijena. Uslijed alfa radioaktivnog raspada ^{234}U nastaje izotop ^{230}Th , pa se na osnovi omjera aktivnosti tih dvaju izotopa može odrediti starost karbonatnog sedimenta, npr. sige, do ~400.000 godina starosti.

Sve spomenute izotopne metode zahtijevaju vrlo složenu i osjetljivu mjernu opremu s obzirom na vrlo niske koncentracije pojedinih izotopa. Uzorci leda (vode), drva i sige određenim se kemijskim postupcima prevedu u plin metan, a zatim se mjerenjem beta aktivnost tih plinova u plinskim proporcionalnim brojačima određuje koncentracija ^3H (Horvatinčić, 1980), odnosno ^{14}C (Srdoč, Slijepčević i Breyer, 1971). Kod $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ metode datiranja iz uzorka sige kemijskim se postupkom separiraju izotopi urana i torija, a mjerenjem njihove alfa aktivnosti u alfa-komori s poluvodičkim detektorom odredi se koncentracija tih izotopa (Horvatinčić, Čalić i Geyh, 2000). Obradom dobivenih podataka na elektronskom računalu odredi se ^{14}C starost, odnosno $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ starost. Sadržaj stabilnih izotopa $^2\text{H}/^1\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ u ledu određen je na masenom spektrometru u Institutu "Jožef Štefan" u Ljubljani.

Rezultati mjerenja starosti leda

Složene analize donešenog materijala obavljene u Zagrebu i Ljubljani dale su speleolozima iznenađujuće, neočekivane rezultate.

Rezultati analize tricija u spomenutim uzorcima leda prikazani su na slici 1. Aktivnost površinskog uzorka leda od 1,3 Bq/L odgovara aktivnosti današnjih oborina na području



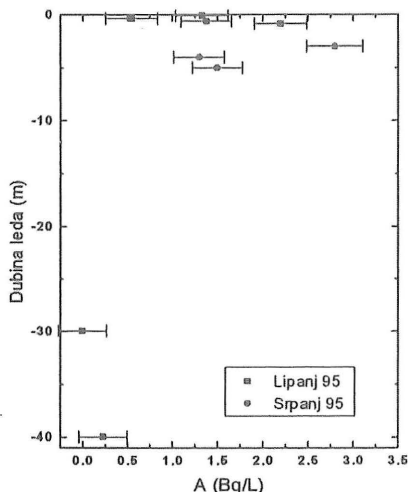
Uzorkovanje leda

Foto: Vlado Božić

Zagreba. Najveća aktivnost tricija zabilježena je na trećem metru od površine leda, 2,8 Bq/L, što znači da led na toj dubini potječe iz razdoblja 1960-1965. kada je aktivnost tricija u atmosferi, zbog termonuklearnih pokusa, bila znatno viša nego danas. Na žalost, uzorci između prvog i trećeg metra dubine nisu mjereni, pa je moguće da se najveća aktivnost tricija nalazi i u tom intervalu. Na osnovi izmjerenih aktivnosti tricija u uzorcima leda i uz pretpostavku da je taloženje leda bilo jednolično tijekom svih godina

nastajanja, vremensko razdoblje stvaranja naslage leda debljine 45 m u Ledenoj jami kreće se između 450 godina (računato s najvećom aktivnosti tricija na trećem metru dubine) i 670 godina (računato s najvećom aktivnosti tricija na drugom metru dubine).

Rezultati mjerenja stabilnih izotopa u uzorcima leda prikazani su na dijagramu (slika 2). Koncentracije izotopa $^2\text{H}/^1\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ određene su u odnosu na koncentraciju tih izotopa u standardnom uzorku, tzv. SMOW standardu, a izražavaju se u $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ vrijednostima u promilima. Vrijednosti $\delta^{18}\text{O}$ kreću se između -6,74 i -10,25 ‰, a $\delta^2\text{H}$ između -50,3 i -67,9 ‰.



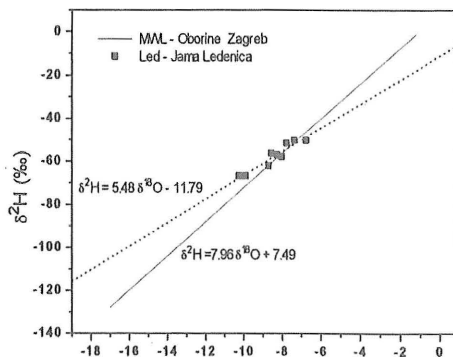
Slika 1. Raspodjela aktivnosti tricija u uzorcima leda prema dubini uzorkovanja od površine lede- ne naslage.

Izmjerene vrijednosti uspoređene su s linijom oborinske vode za Zagreb (slika 2, puna linija, tzv. Meteoric Water Line (MWL), određene na bazi mjerenja mjesečnih oborina za razdoblje 1980-1995 ($r = 0,99$) (Krajcar, Bronić, Horvatinčić i Obelić, 1998). Vrijednosti $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ leda ukazuju uglavnom na utjecaj kontinentalne klime, a stanoviti manjak deuterija u odnosu na MWL (negativni odsječak u jednadžbi pravca, crtkana linija) posljedica je visinskog efekta (1600 m.n.m.), odnosno ukazuje na veću prisutnost oborine iz hladnijeg razdoblja (zime).

Ova analiza leda bilo je prvo iznenađenje, ili bolje rečeno razočaranje, jer je pokazala da led nije iz ledenog doba, što se željno očekivalo, već iz mnogo mlađeg razdoblja.

Relativno malu starost leda može se protumačiti i mogućim kontaminiranjem uzoraka leda vodom s površine, pa bi se možda idući put tome trebalo posvetiti više pažnje, to jest uzorke uzimati iz veće dubine leda i mnogo pažljivije njima rukovati. Ako su uzorci leda dobro uzeti, onda je stvaranje leda iz napadanog snijega počelo tek prije 450-670 godina, a uzrokovano je većim padavinama i većim zahlađenjem, što bi trebalo provjeriti drugim metodama.

Kolebanja klime na Velebitu ima i sada, što je vidljivo iz stanja leda u samo ovih tridesetak godina koliko su to primijetili speleolozi u Ledenoj jami. Od 1966. površina Ulazne dvorane na



Slika 2. Usporedba izmjerenih vrijednosti stabilnih izotopa $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ u uzorcima leda s linijom oborinske vode (MWL).

dubini od 50-60 m znatno se izmijenila. Tada nije bilo prolaza u dublje dijelove jame, a sada postoji i u ovih se posljednjih 6 godina znatno proširio. Kako se otvor sve više povećava, tako se smanjuje i količina leda, što je možda posljedica globalnog zagrijavanja.

Ovako dubok (40 m) i slojevit komad leda promjera dvadesetak metara, jedinstven je u Hrvatskoj i bila bi prava šteta da ga znanstvenici ne iskoriste za daljnja proučavanja.

Rezultati mjerenja starosti drva u ledu

^{14}C datiranje dvaju uzoraka drva, odnosno grana, nađenih u sloju leda na dubini od 15 m (uzorak 1) i 40 m (uzorak 2) od površine ledene naslage, dalo je slične rezultate starosti, iako se očekivala razlika (Tablica 1). Uz pretpostavku jednolične brzine taloženja leda, starost ledene naslage, izračunata na osnovi ^{14}C starosti uzorka

Opis uzorka	Lab. broj	^{14}C starost (godine)	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ starost (godine)
Grana, ~15m od površine leda	Z-2562 (uzorak 1)	150 ± 100	
Grana, ~40m od površine leda	Z-2583 (uzorak 2)	140 ± 90	
Siga iz jame	Z-2584	31 300 ± 3600	301 000 ± 55 000

Tablica 1. Rezultati mjerenja starosti uzoraka grana nađenih u sloju leda i uzorka sige iz Ledene jame.

1, iznosila bi oko 450 godina. Taj se rezultat dobro slaže s procjenom starosti leda bazirane na mjerenju tricija u ledu. Uzorak 2 pokazuje znatno manju starost od očekivane. Moguće objašnjenje za tako "mlad" uzorak jest da grana ne potječe iz razdoblja taloženja leda već da je ovamo dospjela naknadno, kroz pukotinu nastalu između stijene i leda.

Rezultat mjerenja starosti sige

^{14}C datiranjem uzorka sige nađene u jami dobivena je starost od 31.300 ± 3.600 godina. Dobivena ^{14}C starost je na granici ^{14}C metode datiranja što znači da siga može biti mnogo starija. Stoga je isti uzorak datiran i $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ metodom. Izmjerena je starost od 301.000 ± 55.000 godina.

Ovo je veliko, ali ugodno iznenađenje. Treba podsjetiti da sustavna mjerenja starosti siga u Hrvatskoj još nisu proveden i da do sada nisu bile primjenjivane sve nove metode određivanja starosti siga. Dosadašnja su mjerenja pokazala da u Hrvatskoj nema siga starijih od stotinjak tisuća godina, dakle, oko tri puta manje od ove u Ledenoj jami. Taj podatak upozorava na potrebu ponovnih mjerenja u špiljama gdje se već mjerilo, ali novim metodama, a također i na potrebu boljeg proučavanja siga u Ledenoj jami da se ustanovi ne radi li se možda o nekom fenomenu.

Sve ove analize upozoravaju na nedovoljno poznavanje prirodnih procesa s kojima se speleolozi stalno susreću, a koji zavrjeđuju detaljnije proučavanje. Volje i znanja ima, potrebno je osmisliti znanstvene programe i onda

ih ponuditi odgovarajućoj instituciji koja bi ih financirala i provodila. Speleolozi će u tome rado pomoći.

LITERATURA:

Bognar, A., Faivre, S. & Pavelić, J. (1991): Glacijacija sjevernog Velebita. Senjski zbornik, br. 18, str. 181-196, Senj.

Božić, V. (1994): Ledenica u Lomskoj dulibi. Hrvatski planinar, br.3-4, str.81-82, Zagreb.

Horvatinčić, N. (1980): Radiocarbon and tritium measurements in water samples and application of isotopic analyses in hidrology. Fizika, br. 12, str. 201-218, Zagreb.

Horvatinčić, N., Čalić, R. & Geyh, M.A. (2000): Interglacial Growth of Tufa in Croatia. Quaternary Research, br. 53, str. 185-195.

Jalžić, B. (1980): Pojava plavog leda u Ledenoj jami u Lomskoj dulibi na sjevernom Velebitu. Speleolog, br. 26-27, str. 52, Zagreb.

Jalžić, B., Lacković, D. & Šmida, B. (1995): Lomska duliba 93. Speleolog, br.40-41, str. 5-16, Zagreb.

Krajcar, Bronić, I., Horvatinčić, N. & Obelić, B. (1998): Two decades of environmental isotope records in Croatia: Reconstruction of the past and prediction of the future levels. Radiocarbon, br. 40, str. 399-416.

Srdoč, D., Sliječević, A. & Breyer, B. (1971): Datiranje arheoloških nalaza biološkog porijekla metodom ^{14}C . Rad JAZU, br. 349, str. 109-157.

ABSTRACT

The Ledena jama (Ice pit) on Mt. Velebit; a challenge for scientists

During the investigation of Lukina jama located in the Hajdučki kukovi region of the northern part of Mt. Velebit during the years 1993, 1994 and 1995 the Ledena jama in Lomska duliba was also investigated. The pit was also investigated earlier during 1966 and 1973 and



Preparing for the ice sampling

Foto: Vlado Božić

the speleologists found the floor of the pit covered with ice and snow at the depth of 60m. In the summer of 1993 it was determined that a passage exists between the ice and the north wall of the pit wide enough for a person to pass. This led to the discovery of a ice plug fifteen meters in diameter, well bedded and 40m thick. Tree branches were found to be peeking out of the ice in several places. There was a possibility that the ice originated from the Ice age, since the Lomska duliba was formed by an glacier, so the speleologists in agreement with the scientists from the Institute Ruđer Bošković in Zagreb collected samples of ice, tree branches and speleothems for dating.

The results of analysis were surpassing. Dating with radioactive isotopes tritium (^3H), carbon (^{14}C) and thorium and uranium ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$) gave an approximate age of ice of 500 years. This age indicates that the sampling of ice was badly performed (it was contaminated by more recent waters) or that larger temperature variations existed on Mt. Velebit which should be confirmed by other methods. The tree branches were younger which means that they fell into the crack and froze. The most surprising was the age of the speleothem at the depth of 60 m which was estimated at 300 000 years. This is the oldest registered age of speleothems measured in Croatia so far although by a method not used before on speleothems from other caves and pits.

In order to determine the age of this largest piece of old ice in Croatia as well as speleothems from this cave and other caves and pits, further investigation with modern methods should be performed in the future.