

Geol. vjesnik	Vol. 42	str. 187—199	Zagreb 1989.
---------------	---------	--------------	--------------

UDK 556.31:556.114.6.027

Izvorni znanstveni članak

Izotopna istraživanja voda s područja južnog Banata

Nada HORVATINČIĆ¹ i Sanja GRGIĆ²

¹Institut »Ruder Bošković«, Bijenička 54, P.O.B. 1016, YU — 41000 Zagreb

²Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU — 41000 Zagreb

Ključne riječi: Izotopi, Koncentracija, Aktivnost, Podzemne vode, Prividna starost

Key words: Isotopes, Concentration, Activity, Underground waters, Apparent age

Izloženi su rezultati istraživanja radioaktivnih (¹⁴C, ³H) i stabilnih (¹⁸O, ²H) izotopa u podzemnim vodama na području južnog Banata. Međusobna usporedba dobivenih izotopnih rezultata dala je informaciju o porijeklu arteških podzemnih voda i klimatskih uvjeta tokom perioda prihranjivanja.

The results of radioactive (¹⁴C, ³H) and stable (¹⁸O, ²H) isotopes in groundwaters from the area of southern Banat, Yugoslavia, are presented. The comparison of all isotope measurement results gave information about the origin of the artesian groundwaters and climatic conditions during recharge period.

UVOD

Mjerenja sadržaja radioaktivnih izotopa ³H i ¹⁴C, te stabilnih izotopa ²H i ¹⁸O u podzemnim i površinskim vodama imaju sve veću primjenu u hidrološkim i hidrogeološkim istraživanjima (Srdoč, Obedić, Horvatinčić & Slipečević, 1982).

Koncentracija tricija u podzemnim vodama pokazuje da li i u kojoj mjeri recentne površinske vode utječu na podzemne vode, a sistematskim mjerenjima tricija u izvorskim vodama može se odrediti i tzv. srednje vrijeme zadržavanja vode u podzemlju (Mean Residence Time, MRT).

Određivanjem sadržaja ¹⁴C u podzemnim vodama moguće je odrediti tzv. prividnu starost vode, dok se izučavanjem omjera stabilnih izotopa koji su sastavni dio vode (²H/¹H i ¹⁸O/¹⁶O) mogu dobiti vrijedni podaci koji ukazuju na način i uvjete ulaska vode u podzemni akvifer.

Spomenute izotopne metode uz odgovarajuća hidrogeološka istraživanja mogu znatno pomoći kod izrade hidrogeoloških studija.

U okviru izrade studija podzemnih voda za vodoopskrbu južnog Banata (južno od Begeja) a u suradnji s prof. Josipovićem s Univerziteta u Novom Sadu (Josipović, Orlić & Srđević, 1986), izvršena su mjerenja radioaktivnih izotopa ³H i ¹⁴C, te stabilnih izotopa ²H i ¹⁸O u 26 uzoraka vode. Radioaktivni izotopi ³H i ¹⁴C mjereni su u Laboratoriju

za mjerenje niskih aktivnosti Instituta »Ruđer Bošković« u Zagrebu, dok su stabilni izotopi ^2H i ^{18}O mjereni na Institutu »Jožef Stefan« u Ljubljani na Odseku za spektroskopiju.

OPĆI GEOLOŠKI PRIKAZ PODRUČJA

Prema regionalnom pregledu (R a k i ć, 1985) kvartarni sedimenti južnog Banata pripadaju eopleistocenu, pleistocenu i holocenu.

U eopleistocenu izdvojeni su riječno-jezerski ili policiklički sedimenti i tzv. Zagajička serija sedimenata. Riječno-jezerski sedimenti izgrađeni su u južnom dijelu Banata od srednjeznih, rjeđe krupnozrnih šljunaka, a sjevernije od linije Vršac-Banatska Subotica-Parta-Nikolinačko brdo-Crepaja od srednjeznih i krupnozrnih pijesaka s pojavama tankih proslajaka praha i gline. Naslage su dobile ime policiklične jer je uočeno smjenjivanje potpunih (šljunak-pijesak-prah ili glina) i nepotpunih (šljunak-pijesak, pijesak-prah) ciklusa po vertikali. Riječno-jezerski sedimenti leže diskordantno preko različitih nivoa ponta ili preko različitih litoloških članaka paludinskih slojeva (ekvivalenata gornjeg pliocena).

U hidrogeološkom smislu riječno-jezerski sedimenti predstavljaju vodopropusne sredine značajnih kolektorskih karakteristika. Naslage su debljine do 80 metara, imaju bazensku građu i u južnom Banatu su antiklinalno nagnute prema sjeveru. Granice ovih šljunkovito-pjeskovitih sedimenata su neravne, a gornja primarno subhorizontalna granica bila je izložena intenzivnoj eroziji, te naslage na različitim dijelovima područja imaju različitu debljinu. Nastanak mlađih dijelova riječno-jezerskih sedimenata vremenski se podudara s tzv. Zagajičkom serijom sedimenata koju čine većinom prašinsti sedimenti, sitnozrni prašinsti pijesci i crvenkasti prašinsto-glinoviti horizonti ili leće crvenkastog fosilnog tla s krupnim čistim vapnenačkim konkrecijama. Iako većina strukturnih članova ima lesoidni oblik, to su tipično terestičko-barski sedimenti, taloženi pod toplim klimatskim uvjetima u stepama s izmjenom suhih i vlažnih perioda. Naslage Zagajičke serije su znatne debljine, ponegdje i više od 120 m, nastale kroz dugi vremenski period akumuliranja materijala karpatskim rijekama, posebno tokom proljetnih visokih voda, te ljetnim pretaložavanjem sedimenata eolskim djelovanjem. S obzirom na svoje hidrogeološke karakteristike Zagajička serija iako nije potpuno bezvodna, čini vodonepropusnu sredinu.

U pleistocenu na području južnog Banata dolazi do taloženja prapora i pijesaka Deliblatske peščare. Formirane praporne terase u dolinama Dunava, Tise i Tamiša u donjem dijelu izgrađene su uglavnom od riječnih pijesaka, praha i gline, dok u gornjem dijelu prevladavaju eolski prašinsti materijali i fosilna tla. Na južnom rubu Deliblatske peščare, u donjem dijelu, na Zagajičkoj seriji sedimenata, leže vodopropusni pijesci gdje dolazi do dreniranja podzemnih voda akumuliranih u kompleksu »živih pijesaka«. U dolinama Tamiša i Tise podlesne naslage su zastupljene prašinstim i glinovitim materijalima, te zbog toga predstavljaju izolator ograničenog prostiranja. U njihovoj podini nalaze se vodopropusni riječno-jezerski sedimenti. U riječnim dolinama, 7 do 12 m iznad lokalnih erozionih baza, nalazi se kao fluvijalni nivo tzv. Varoška terasa

koja je u donjem dijelu izgrađena od pijesaka facijesa korita, a u gornjem od prašiniastih i glinovitih sedimentata.

Eolski živi pijesci Deliblatske peščare leže preko primarnog nagiba Zagajičke serije. Nagnuti su u smjeru juga i jugozapada, što ukazuje i na smjer toka podzemne vode sa slobodnom razinom prema kovinskoj »depresiji«. Maksimalna debljina pijesakova je 80 m. Pretpostavlja se da je Deliblatska peščara oblikovana krajem pleistocena u uvjetima hladne klime unutar periglacialnih područja.

U dolinama rijeka Dunava, Tamiša i Tise nalaze se aluvijalni sedimenti debljine 6—15 m koje čine u donjim dijelovima šljunci i pijesci facijesa korita iznad kojih slijede prašiniasti i organogeno-barski sedimenti.

Deluvijalni sedimenti zastupljeni su zastorima koji se i danas stvaraju na blagim brdskim padinama debljine do 10 m izgrađenim od prašinasnog materijala prapornog habitusa.

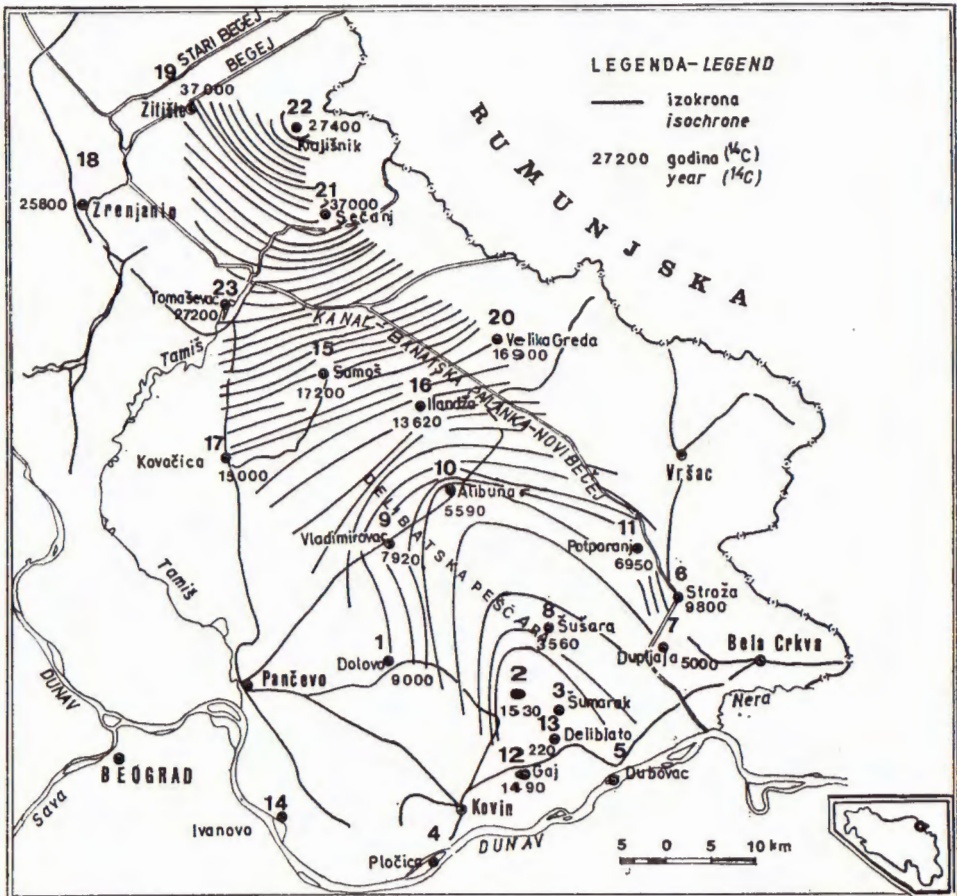
IZOTOPNE METODE

Izotop ^{14}C

Izotop ^{14}C nastaje u gornjim slojevima atmosfere reakcijom neutrona s atomima dušika. U obliku CO_2 ulazi u biosferu, pa s površinskim vodama ulazi i u podzemlje. Istovremeno, koncentracija izotopa ^{14}C smanjuje se po zakonu radioaktivnog raspada uz poluvrijeme od 5730 godina, te je tokom milenija uspostavljena ravnoteža. U ovom stoljeću ravnoteža je narušena ljudskom djelatnošću (izgaranjem fosilnih goriva, nuklearnim pokusima u atmosferi). Nakon ulaska u podzemlje voda više nije u kontaktu s atmosferom, pa se raspadnuti izotop ^{14}C ne nadoknađuje novo stvorenim. Pomoću zakona radioaktivnog raspada moguće je izračunati vrijeme proteklo od ulaska vode u podzemne akvifere. Naravno, rezultat predstavlja samo srednje vrijeme zadržavanja vode, budući da su različite količine vode mogle u sistem podzemne vode ući u različito vrijeme. Tom metodom moguće je odrediti starost do oko 40000 godina (Mook, 1980).

Glavni problem kod određivanja starosti voda metodom ^{14}C je određivanje početne aktivnosti ^{14}C (A_0). Naime, zbog složenih kemijskih i fizičkih procesa koji se odigravaju u vodi na njihovom putu kroz tlo u podzemne rezervoare, početna koncentracija ^{14}C nije ista u različitim vodonosnim sistemima i ovisi prvenstveno o geologiji područja prihranjivanja (Mook, 1980; Geyh, 1972; Krajcar-Bronić, Horvatinčić, Srdoč & Obelić, 1986; Srdoč, Krajcar-Bronić, Horvatinčić & Obelić, 1986). Pogreška zbog nepoznavanja početne koncentracije ^{14}C može iznositi i nekoliko tisuća godina, što može biti značajna pogreška određuje li se starost mlađih voda. Stoga se rezultati ^{14}C aktivnosti voda često puta izražavaju kao omjer ^{14}C aktivnosti u uzorku u odnosu na ^{14}C aktivnost suvremenog standarda, izraženo u postocima (pMC). Za ispitivano područje južnog Banata za početnu aktivnost ^{14}C koristila se vrijednost od 85‰.

Na području južnog Banata sakupljeno je 20 uzoraka podzemne vode za ^{14}C analize i to: 9 uzoraka na crpnim stanicama, 8 uzoraka na arteškim bunarima, 2 uzorka na rasteretnim bunarima, te 1 uzorak na izvoru



Sl. 1 Karta izokrona podzemnih voda južnog Banata.

Fig. 1 Isochrones map of groundwaters in southern Banat, Yugoslavia.

u Deliblatskoj peščari (vrelo Klokot). Također je napravljena i jedna ¹⁴C analiza površinske vode Dunava kod Kovina. Na sl. 1 prikazane su lokacije uzorkovanja vode po rednom broju uzimanja, a u tablici 1 su rezultati izotopnih analiza svih uzoraka.

Za jednu ¹⁴C analizu bilo je potrebno 100–150 l vode, ovisno o koncentraciji otopljenih bikarbonata. Otopljeni ugljik se iz vode izlučuje u obliku teško topivog barijevog karbonata. Taloženje BaCO₃ se izvodilo na terenu u 50-litarskim taložnicama. Dodatkom zasićene otopine BaCl₂ uz prethodno podešavanje pH vode na ~8, te uz dodatak odgovarajućih sredstava (FeSO₄ i Praestola), nastali talog BaCO₃ sakuplja se u plastičnim bocama volumena 1 l pričvršćenim na dno taložnika. Talog BaCO₃ se dalje kemijski obrađuje u laboratoriju, otapanjem karbonata u konc. H₃PO₄ u struji dušika. Dobiveni CO₂ se prevodi u metan redukcijom s vodikom uz rutenij kao katalizator na 450°C.

^{14}C aktivnost uzorka u obliku metana mjeri se u proporcionalnom brojaču 24 sata, a dobiveni podaci dalje se kompjutorski obrađuju (Horvatinčić, 1980).

Tricij

Tricij (^3H) također nastaje reakcijom dušika s produktima kozmičkog zračenja u gornjim slojevima atmosfere. Kao sastavni dio molekule vode, tricij se raspoređuje po cijeloj hidrosferi dospijevajući i u podzemne vode. Između stvorenih atoma ^3H i onih koji se raspadaju radioaktivnim putem (vrijeme poluraspada 12.4 godine) uspostavilo se u prošlosti ravnotežno stanje. Aktivnost tricija izražava se obično tzv. tricijevim jedinicama (1 TU = 1 atom ^3H : 10^{18} atoma ^1H). Ravnotežno stanje tricija u atmosferi znatno je poremećeno termonuklearnim pokusima u razdoblju nakon rata, pa je 1963. godine zabilježen maksimum od 6500 TU u oborinama (Gat, 1980). Nakon prestanka nuklearnih pokusa u atmosferi, aktivnost tricija u oborinama postepeno opada i danas se kreće između 10 i 30 TU na području sjeverozapadne Hrvatske (Horvatinčić, Krajcar Bronić, Pezdić, Srdoč & Obelić, 1986). Na osnovu poslijeratnog markiranja izotopom ^3H moguće je razlikovati one vode koje su tokom zadnjih 40 godina prihranjivane oborinama, odnosno površinskim vodama, od onih koje su bile u potpuno zatvorenim vodonosnicama.

Za praćenje aktivnosti tricija u podzemnim vodama nužno je poznavanje aktivnosti tricija u oborinama za svako ispitivano područje.

Kod istraživanja južnog Banata mjerena je aktivnost tricija u 20 uzoraka podzemnih voda, 3 uzorka kišnice i 3 uzorka površinskih voda Dunava (sl. 1, tablica 1).

Za mjerenje aktivnosti tricija potrebno je 50 ml vode. Reakcijom s aluminijevim karbidom (Al_4C_3) na 150°C voda se prevodi u metan. Kemijskim postupkom metan se pročišćava od prisutnih onečišćenja, a zatim se njime puni proporcionalni brojač kojim se mjeri aktivnost, odnosno koncentracija tricija u uzorku (Horvatinčić, 1980).

Stabilni izotopi

U hidrološkim i hidrogeološkim istraživanjima od velike je važnosti određivanje omjera izotopa $^2\text{H}/^1\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ u oborinama, površinskim i podzemnim vodama. Koncentracija navedenih izotopa, koji su sastavni dijelovi molekula vode, variraju u prirodnim uvjetima zbog izotopne frakcionacije do koje dolazi pri faznim prijelazima vode. Frakcioniranje ovisi o tlaku i izotopnom sastavu vodene pare, a naročito o temperaturi faznog prijelaza: što je temperatura niža, efekt frakcioniranja je veći (IAEA Technical Reports Series, 1981).

Ovisnost frakcionacije o temperaturi uzrokom je nekoliko efekata karakterističnih za oborine:

— efekt geografske širine (od polova prema ekvatoru u oborinama prevladavaju teži izotopi)

— efekt godišnjih doba (ljetne oborine su bogatije težim izotopima od zimskih)

Tablica 1. Rezultati izotopnih analiza podzemnih voda s područja južnog Banata
 Table 1. Results of isotope analysis of groundwaters in southern Banat, Yugoslavia

Uzorak Sample	Lokacija Location	T-aktivnost T-activity (TU \pm σ)	^{14}C starost (god.) ^{14}C age (year)	$\delta^2\text{H}$ (SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)
1	Dolovo Arteški bunar Crpna stanica	inaktivan	9000 \pm 190	-75.0	-10.10
2	Deliblatska peščara Omladinsko naselje Crpna stanica	inaktivan	1530 \pm 140	-70.3	- 9.94
3	Deliblatska peščara Izvor H-11 (arteški piezometar)	inaktivan	83.6‰ mod.	-72.0	- 9.61
4	Dunav kod Kovina	30.4 \pm 1.6	107.0‰ mod.	-78.0	-10.20
5	Dunav kod Dubovca	31.7 \pm 1.8	—	-79.0	-10.60
6	Straža Crpna stanica (2 bunara)	inaktivan	9800 \pm 200	-80.0	-10.58
7	Dupljaja Arteški bunar	inaktivan	5000 \pm 150	-74.0	- 9.92
8	Šušara Crpna stanica	inaktivan	3560 \pm 130	-72.0	- 9.74
9	Vladimirovac (B-1) Crpna stanica	inaktivan	7920 \pm 140	-79.0	-10.27
10	Alibunar Arteški bunar	inaktivan	5580 \pm 140	-72.0	- 9.0
11	Potporanj Rasteretni bunar	inaktivan	6950 \pm 160	-72.0	- 9.94
12	Gaj Rasteretni bunar	inaktivan	1490 \pm 115	-70.0	- 8.94
13	Deliblatska peščara Vrelo »Klokot«	inaktivan	220 \pm 110	-76.0	- 9.68
14	Dunav kod Ivanova	24.3 \pm 1.7	—	-73.0	- 9.24
15	Samoš (B-1) Crpna stanica	inaktivan	17200 \pm 450	-95.0	-12.40
16	Ilandža Arteški bunar	inaktivan	13620 \pm 300	-76.0	- 9.71
17	Kovačica-Sečerana (crpna stanica)	inaktivan	15000 \pm 350	-90.0	-11.69
18	Zrenjanin Crpna stanica	inaktivan	25800 \pm 1200	-74.0	- 9.92
19	Zitište— tvornica plastike	inaktivan	> 37000	-75.0	-10.10
20	Velika Greda Arteški bunar	inaktivan	16900 \pm 400	-75.0	-10.59

21 Sečanj Arteški bunar	inaktivan	> 37000	—79.0	—10.27
22 Krajišnik Crpna stanica	inaktivan	27400 ± 1400	—96.0	—12.49
23 Tomaševac Arteški bunar (negativan)	inaktivan	27200 ± 1400	—102.0	—13.00
24 Sušara - kišnica (apr. 1985)	18.7 ± 1.5	—	—40.0	— 6.44
25 Sušara - kišnica (maj 1985)	17.4 ± 1.6	—	—35.0	— 5.30
26 Deliblatska peščara (jan. 1985)	14.5 ± 1.6		—147.0	—19.41

— kontinentalni efekt (koncentracija težih izotopa veća je u kišnicama uz obalu od onih u unutrašnjosti).

Izotopni sastav vode izražava se kao relativno odstupanje (δ) omjera težeg izotopa prema lakšem u uzorku (R_{uz}) prema omjeru tih izotopa u standardu (R_{stand}), a daje se u promilima:

$$\delta = \frac{R_{uz} - R_{stand}}{R_{stand}} \cdot 1000 (\text{‰})$$

Kod istraživanja južnog Banata mjerena je koncentracija stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ u 20 uzoraka podzemnih voda, 3 uzorka kišnice i 3 uzorka površinskih voda Dunava (sl. 2. tablica 1).

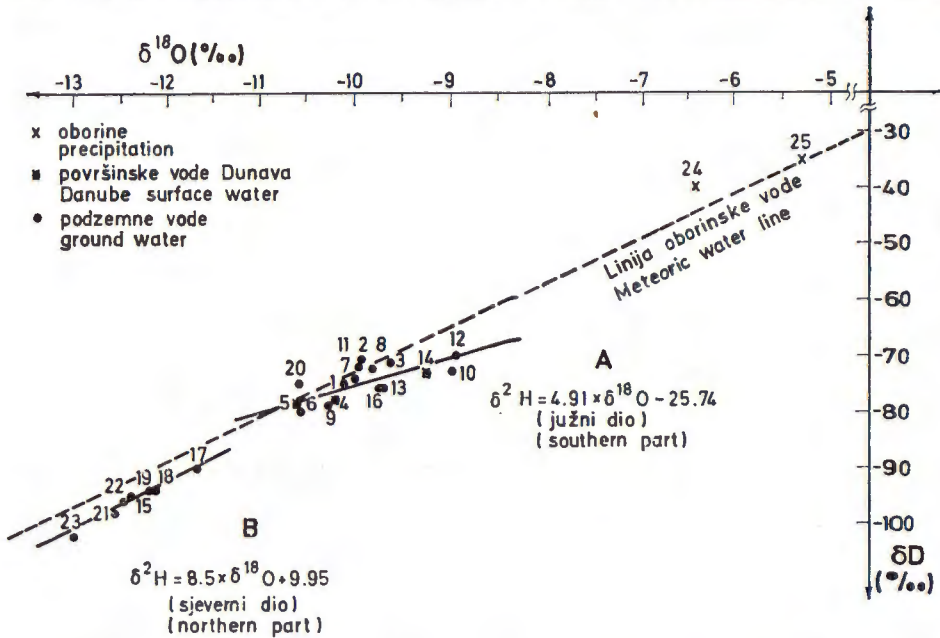
Za mjerenje sadržaja izotopa ^{18}O potrebno je oko 20 ml vode. Metoda pripreme uzorka sastoji se u izotopnoj izmjeni kisika u vodi s kisikom u ugljičnom dioksidu određenog sastava, paralelno za uzorke kao i za standarde. Kada se postigne izotopna ravnoteža, CO_2 se stavlja u maseni spektrometar gdje se mjeri njegov izotopni sastav.

Kod mjerenja sadržaja deuterija, voda se kvantitativnom redukcijom s cinkom u redukcionoj peći prevodi u vodik koji se zatim unaša u maseni spektrometar, gdje se mjeri njegov izotopni sastav. Kao standard kod mjerenja $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ koristi se »Standard Mean Ocean Water« (SMOW).

REZULTATI MJERENJA

Izotopni sastav oborina

Za praćenje aktivnosti tricija, te koncentracije stabilnih izotopa ^2H i ^{18}O u podzemnim vodama potrebno je poznavanje koncentracije tih izotopa u oborinama i površinskim vodama na ispitivanom području. U tu svrhu mjereni su izotopi ^2H , ^{18}O i tricij triju uzoraka oborina sakupljenih u januaru, aprilu i maju 1985. godine na području Deliblatske peščare (uzorci br. 24, 25 i 26, sl. 2 tablica 1). Rezultati su vrlo slični rezultatima izotopnog sastava oborina u Zagrebu, gdje se tricij sistematski mjeri od 1976. godine, a stabilni izotopi od 1980. godine (IAEA Technical Report Series, 1986).



Sl. 2 Sadržaj stabilnih izotopa deuterija i ^{18}O u vodama s područja južnog Banata.
 Fig. 2 ^{18}O and deuterium composition of water samples in southern Banat.

Aktivnost tricija januarskog snijega (14.5 ± 1.5 TU) nešto je niža od aktivnosti proljetnih kiša (18.7 ± 1.5 TU), što je i za očekivati, budući da su zimske oborine uvijek niže aktivnosti od ljetnih.

Sadržaj deuterija, kao i ^{18}O , bitno se razlikuje između uzorka snijega u januaru ($\delta^2\text{H} = -147\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -19.4\text{‰}$) i uzorka kišnice u aprilu i maju ($\delta^2\text{H} = -37.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -5.8\text{‰}$), jer sadržaj stabilnih izotopa u vodi ovisi o temperaturi. Rezultati su u skladu s onima dobivenim u Zagrebu (srednje vrijednosti za januar 1985. su $\delta^2\text{H} = -113.4\text{‰}$, odnosno $\delta^{18}\text{O} = -14.8\text{‰}$, dok su srednje vrijednosti za maj $\delta^2\text{H} = -52.8\text{‰}$, odnosno $\delta^{18}\text{O} = -7.5\text{‰}$). Izmjerene vrijednosti $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ slijede pravac (linija oborinske vode) koji je dobiven višegodišnjim mjerenjem stabilnih izotopa ^2H i ^{18}O u oborinama Zagreba i Ljubljane (Horvatinčić, Krajcar Bronić, Pezdić, Srdoč & Obelić, 1986):

$$\delta^2\text{H} = 7.8 \delta^{18}\text{O} + 5.5$$

Izotopni sastav dunavske vode

Uzorki vode Dunava (br. 4, 5 i 14 u tablici 1) uzeti su na tri lokacije sredinom maja 1985. Izvršene su analize ^2H , ^{18}O i tricija, a kod uzorka Dunava kod Kovina izmjerena je i aktivnost ^{14}C . Rezultati mjerenja aktivnosti tricija daju vrijednosti slične aktivnostima tricija u rijeci Savi, što u stvari predstavlja srednju aktivnost doprinosa svih pritoka.

Vrijednosti stabilnih izotopa kreću se za deuterij od -79.0 do -73.0% u odnosu na standard SMOW, a za $\delta^{18}\text{O}$ od -10.6 do -9.24% . Usporedbom s linijom oborinske vode vidljivo je lagano smanjenje količine deuterija u odnosu na sadržaj izotopa kisika (na sl. 2 pomak u desno) i to neznatno za uzorak 4, dok je taj pomak za uzorak 14 znatniji, što je karakteristično za vode koje su nastale od oborina podvrgnutih isparavanju ili same isparavanju.

Izotopni sastav podzemnih voda

Tricij

Rezultati aktivnosti tricija u ispitivanim uzorcima prikazani su u tablici 1. Svi uzorci podzemnih voda sa šireg područja Deliblatske pešcare pokazuju da im je aktivnost ispod granice detekcije mjernog sistema od 1.7 TU. Obzirom da izmjereni uzorci dunavske vode (4,5 i 14) i oborina (14, 25 i 26) pokazuju aktivnost tricija karakterističnu za površinske i oborinske vode, može se zaključiti da ne postoji neposredna infiltracija dunavske vode i oborina u podzemne vode ispitivanog područja. Analize tricija pokazuju da je vrijeme infiltracije u svakom slučaju veće od 40 godina.

Izotop ^{14}C

Rezultati ^{14}C starosti ispitivanih uzoraka vode dani su u tablici 1, a na sl. 1 dan je prikaz ^{14}C starosti podzemnih voda u obliku izokrona. ^{14}C analize 20 uzoraka vode dale su rezultate u rasponu od suvremenog uzorka (br. 3) do onih koji su na granici detekcije sistema od 37000 godina (br. 19 i 21). Idući od juga prema sjeveru ^{14}C starost voda je sve veća. Na području Deliblatske pešcare i južno nalazimo na skoro suvremenu vodu (br. 3 ima aktivnost od 83.6‰ suvremenog standarda), a ostale vrijednosti su od 220 do 9600 godina. Sjeverno od linije Samoš—Velika Greda izmjerene starosti daleko su veće, a na nasjevernijem dijelu ispitivanog područja nailazimo na vodu čija je starost izvan granice detekcije (> 37000 godina).

Uzorcima podzemne vode s nekoliko lokaliteta (br. 6, 8 i 18) ne daju realne vrijednosti ^{14}C aktivnosti jer su uzete iz bunara koji kaptiraju više vodonosnih horizonata. Usprkos tome što dobivene vrijednosti odgovaraju nekoj miješanoj vodi s različitih dubina dobro se uklapaju u opću sliku područja prikazanoj na karti izokrona (sl. 1).

Stabilni izotopi

Rezultati mjerenja stabilnih izotopa ^2H i ^{18}O u podzemnim vodama ispitivanog područja dani su u tablici 1, a grafički prikaz linije $\delta^2\text{H}$ — $\delta^{18}\text{O}$ dan je na sl. 2. Uzorke podzemnih voda možemo podijeliti na dvije grupe, prema rezultatima mjerenja koncentracije stabilnih izotopa: u grupu A spadaju uzorci s južnog dijela ispitivanog područja (uzorci br. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16 i 20), a u grupu B sa sjevernog dijela (uzorci br. 15, 17, 18, 19, 21, 22 i 23). Linije za pojedine grupe su:

$$\begin{array}{ll} \text{A} & \delta^2\text{H} = 4.91 \delta^{18}\text{O} - 25.74 \\ \text{B} & \delta^2\text{H} = 8.50 \delta^{18}\text{O} + 9.95 \end{array}$$

Linija $\delta^2\text{H}$ — $\delta^{18}\text{O}$ za uzorke iz grupe A ukazuje na smanjenje vrijednosti $\delta^2\text{H}$ prema $\delta^{18}\text{O}$ u odnosu na kišnice (manji nagib pravca), što ukazuje na to da je u akvifer ušla voda koja je kao kišnica bila podvrgnuta isparavanju. Za uzorke grupe B sve vrijednosti $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ su niže od vrijednosti za uzorke iz grupe A, što ukazuje na to da su te vode nastale u hladnijim razdobljima.

ZAKLJUČAK

Na osnovu mjerenja radioaktivnih izotopa tricija (^3H) i ugljika (^{14}C), te stabilnih izotopa ^2H i ^{18}O u 20 uzoraka podzemnih voda, 3 uzorka površinskih voda Dunava i 3 uzorka oborina s područja južnog Banta možemo zaključiti slijedeće:

1. Rezultati mjerenja aktivnosti tricija u podzemnim, uglavnom arteškim vodama na području južnog Banata pokazala su da ne postoji direktan utjecaj oborinskih i površinskih voda u posljednjih 40 godina. Proces infiltracije kroz krovinske glinovito-prašinate polupropusne naslage očigledno je vrlo spor i premda se ne može zanemariti ne predstavlja značajan doprinos obnavljanju rezervi podzemnih voda.

2. Rezultati mjerenja apsolutne starosti metodom ^{14}C 20 uzoraka podzemnih voda pokazuju da starost voda na ispitivanom području iznosi 83% suvremene aktivnosti (što odgovara recentnim vodama), pa sve do vrlo starih (> 37000 godina). Korelacija između ^{14}C starosti i koncentracije stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u podzemnim vodama omogućili su izdvajanje tri karakteristična dijela područja južnog Banata s obzirom na vrijeme ulaska vode u podzemni arteški sistem i klimatske prilike koje su tada vladale.

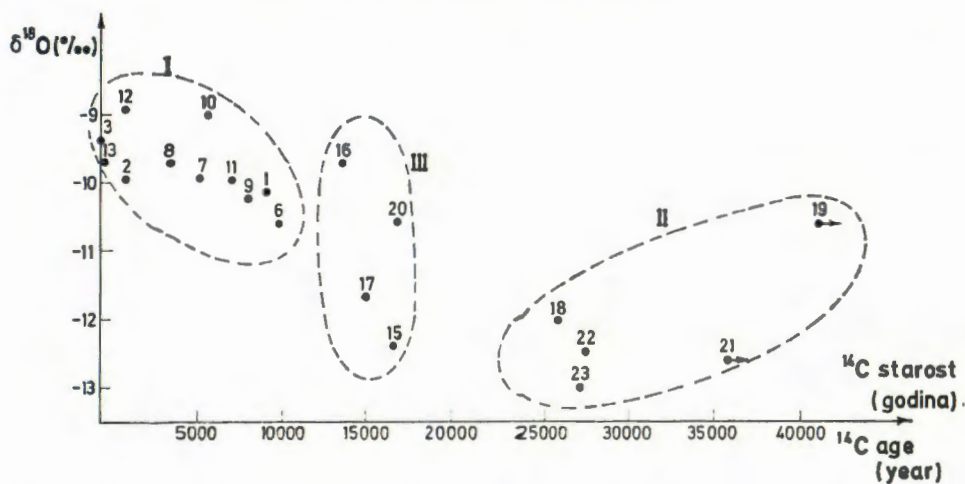
Prva grupa uzoraka (sl. 3 i 4) odnosi se na južni dio istraživanog terena. To su podzemne vode koje su ušle u podzemlje suvremenim holocenskim prihranjivanjem površinskih i oborinskih vodama unazad 10000 godina. Izmjereni povišeni sadržaji stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H svojstveni su za današnje toplije klimatsko razdoblje.

Podzemne vode na sjevernom dijelu istraživanog područja pripadaju drugoj grupi uzoraka. Ušle su u sistem podzemne vode prije više od 25000 godina, a neke su i starije od granice detekcije metode ^{14}C (> 37000 godina). Zbog nižeg sadržaja stabilnih izotopa može se reći da je klima tokom njihove infiltracije u podzemlju bila hladnija nego današnja i vjerojatno je pripadala nekom periodu zahlađenja.

U središnjem dijelu područja izdvojena je treća grupa uzoraka podzemnih voda čije karakteristike odražavaju prijelaz između dvije spomenute grupacije.

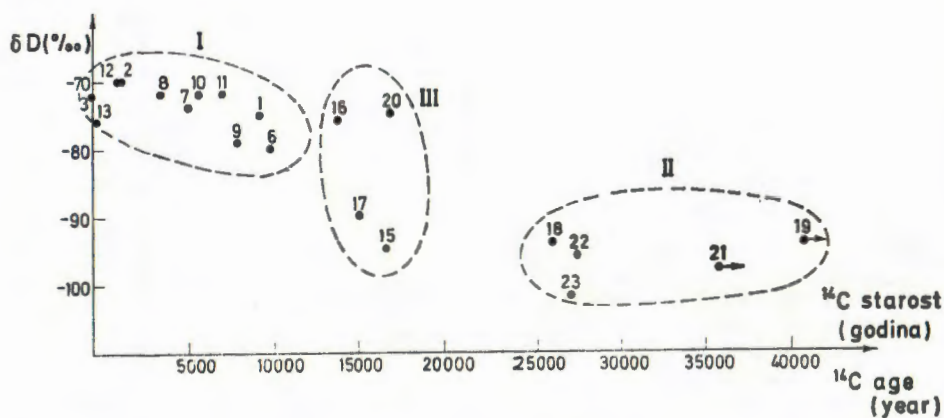
3. Prema karti izokrona zapaženo povećanje ^{14}C starosti podzemnih voda od juga prema sjeveru istraživanog područja južnog Banata pokazuje moguću smjer utjecaja površinskih voda, te se zbog toga krajnji južni dio Banata može prihvatiti kao zona mogućeg područja brže infiltracije suvremenih oborinskih i površinskih voda u podzemlje.

4. Izmjerene ^{14}C starosti podzemnih voda odražavaju prošlost ovog arteškog vodonosnog sistema, posebno u uvjetima današnje eksploatacije podzemne vode na tom području. Bilo kakvo računanje brzina toka pod-



Sl. 3 Korelacija između ^{14}C starosti i koncentracije izotopa ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$) u podzemnim vodama južnog Banata.

Fig. 3 Relationship between ^{14}C age and ^{18}O concentration ($\delta^{18}\text{O}$) of groundwaters in southern Banat.



Sl. 4 Korelacija između ^{14}C starosti i koncentracije izotopa ^2H ($\delta^2\text{H}$) u podzemnim vodama južnog Banata.

Fig. 4 Relationship between ^{14}C age and ^2H concentration ($\delta^2\text{H}$) of groundwaters in southern Banat.

zemne vode iz područja niže starosti prema području veće starosti na osnovu karte izokrona ne bi imalo smisla jer bi dobivene vrijednosti bile u neskladu sa stvarnom dinamikom kretanja podzemne vode na području južnog Banata.

Primljeno: 06. 01. 1989.

LITERATURA

- Gat, J. R. (1980): Tritium in atmospheric waters. In Fritz, P. and Fontes J. Ch. »Handbook of environmental isotope geochemistry«, 22—28, Elsevier.
- Geyh, M. A. (1972): On the determination of the initial ^{14}C content in groundwater, Proc. of the Eight Inter. Conf. on Radiocarbon Dating, vol. 1, D59—D69, New Zealand.
- Horvatinčić, N. (1980): Radiocarbon and tritium measurements in water samples and application of isotopic analyses in hydrology. *Fizika*, 12(S2), 201—218, Zagreb.
- Horvatinčić, N., Krajcar Bronić, I., Pezdić, J., Srdoč, D. & Obelić, B. (1986): The distribution of radioactive (^3H , ^{14}C) and stable (^2H , ^{18}O) isotopes in precipitation, surface and groundwaters during the last decade in Yugoslavia. *Nuclear Instrum. Meth. in Physics Research*, B17, 550—553.
- IAEA Technical Reports Series No 210, (1981): Stable isotope hydrology, 1—339, Vienna.
- IAEA Technical Reports Series No 264, (1986): Environmental Isotope Data No 8: World survey of isotope concentration in precipitation (1980—1983), 43, Vienna.
- Josipović, J., Orlić, B. & Srđević, B. (1986): Hidrogeološka istraživanja za potrebe regionalnog vodosnabdijevanja, Fond Poljoprivrednog fakulteta, Novi Sad.
- Krajcar Bronić, I., Horvatinčić, N., Srdoč, D. & Obelić, B. (1986): On the initial ^{14}C activity in karst aquifers with short mean residence time. *Radiocarbon*, 28, 436—440.
- Mook, W. G. (1980): Carbon-14 in hydrogeological studies. In Fritz, P. and Fontes, J. Ch.: »Handbook of environmental isotope geochemistry, 49—71, Elsevier.
- Rakić, M. (1985): Kvartarne naslage južnog Banata, Fond Poljoprivrednog fakulteta, Novi Sad.
- Srdoč, D., Horvatinčić, N., Obelić, B., Krajcar Bronić, I. & Sliječević, A. (1985): Procesi taloženja kalcita u krškim vodama s posebnim osvrtom na Plitvička jezera. *Krš Jugoslavije*, 11(4—6), 101—204, JAZU, Zagreb.
- Srdoč, D., Krajcar Bronić, I., Horvatinčić, N. & Obelić, B. (1986): The increase of ^{14}C activity of dissolved organic carbon along the river course. *Radiocarbon*, 28, 515—521.
- Srdoč, D., Obelić, B., Horvatinčić, N. & Sliječević A. (1982): Isotope analyses of groundwaters of the North African Plain. *Catena*, 9, 253—264.

Isotope Investigations of Groundwater of Southern Banat in Yugoslavia

N. Horvatinčić and S. Grgić

A comprehensive hydrogeological study of groundwaters was carried out to establish water resource capacity of southern Banat in Vojvodina, Yugoslavia. Measurements of radiocarbon and tritium activity as well as a stable isotope content (^2H , ^{18}O) were performed as a part of these investigations. Tritium, deuterium and ^{18}O in precipitation in the investigated area as well as in Danube river were measured too.

The investigated area is situated in Quaternary formations consisting of the following Eopleistocene deposits: Fluvial-lake sediments, terrestrial marsh sediments, Pleistocene loess terraces and eolian sands, Holocene alluvial sediments and organogenous marsh deposits.

The stable isotope content is presented in Fig. 2 and the correlation with the radiocarbon ages is shown in Fig. 3 and 4. All of the samples can be divided into three groups:

Group 1: Samples from southern part of the investigated area having ^{14}C ages up to 10,000 years indicate Holocene precipitation. A lightly increased deuterium and ^{18}O content indicates recharging of aquifers during warmer climatic periods. The stable isotope contents are close to those measured in Danube river water.

Group 2: Samples from northern part of the investigated area with radiocarbon ages from 25,000 years up to the limit of the method (37,000 a). A lower deuterium and ^{18}O content indicate waters from cooler climatic periods.

Group 3: Samples of an intermediate group having ^{14}C ages from 14,000 to 17,000 years, geographically situated in the region between groups 1 and 2. Hydraulic connection with other two groups cannot be excluded. No significant influence of direct surface water infiltration in last 40 years takes place in any of the investigated areas, as proved by measurements of the tritium activity of groundwater samples.