

РЕЖИМ ИЗДАНСКИХ ВОДА КАРСТНОГ ПЛАТОА БАБИНЕ (ЈЗ СРБИЈА, ПРИЈЕПОЉЕ)

БРАНИСЛАВ ПЕТРОВИЋ*, ВЕЉКО МАРИНОВИЋ*, ЗОРАН
СТЕВАНОВИЋ*, САША МИЛАНОВИЋ*, ЉИЉАНА ВАСИЋ*

А п с т р а к т. – Карстни плато Бабине се налази у западној Србији на око 300 km југозападно од Београда и највећим делом припада општини Пријепоље, док се делом простире и на територији Црне Горе, па је познавање хидрогеолошких особина овог међуграничног подручја утолико значајније. Карстна површ Бабине представља флувијални реликт формиран преко дебелих наслага тријаских карбоната. Карбонатни комплекс има значајно вертикално распрострањење, а дебљина седимената варира од 150 до 750 m, у појединим деловима и до 1200 m. Услед тога, процес карстификације је изузетно развијен, па се на површи Бабине може уочити значајан број површинских и подземних карстних облика. Дебљина карбонатног комплекса варира од 150 до 750 m, могуће и до 1200 m, у подини офиолита јурске старости. На површи се среће велики број површинских и подземних карстних облика. Најбројнији карстни ерозиони облици су вртаче и суве долине са висећим ушћима изнад активних водотокова, као и следе долине, које сведоче о некада добро развијеној речној мрежи. Среће се и више понора и мањих пећина. Карстна издан формирана је у карбонатним стенама тријаске старости. Најважнији вид прихрањивања ове издани јесте инфилтрација падавина. На деловима где су кречњаци откривени, издан се храни директном инфилтрацијом атмосферских вода и понирањем великог броја површинских токова који се формирају на офиолитима и вулканитима (андезити и дацити). Пажњење, тј. дренарање карстне издани површи Бабине врши се преко три велика врела: Сељашница и Бучје у Србији и Брезница (Бездан) у Црној Гори. Постоје подаци о ранијим опитима трасирања (из 70-их и 80-их година XX века), изведених на карстној површи и њеном ободу. Резултати обележавања подземних токова указују на постојање везе између понора Бегова Локва (на ЈЗ ободу површи у Црној Гори) и врела Брезница (Бездан) код Пљеваља, односно између понора Тмуша и врела Бучје (СЗ обод површи), док опит трасирања у непосредном сливу врела Сељашнице није рађен до ових истраживања. Истраживањима у периоду 2015–2017. године утврђено је постојање везе између понора Швабаре (насеље Јабука на карстној површи) и врела Сељашнице (источни обод карстне површи). Специфичност опита је та

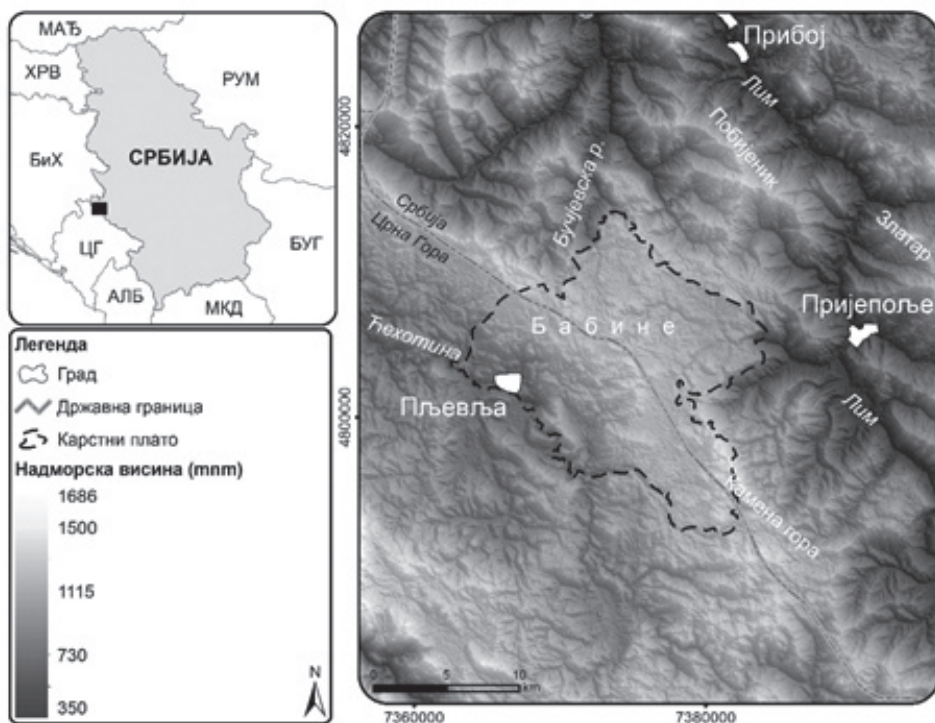
* Центар за хидрогеологију карста, Департман за хидрогеологију, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Ђушина 7, 11000 Београд; и-мејл: zstev_2000@yahoo.co.uk

да је као трасер коришћена кухињска со (NaCl) за време пролећних „високих“ вода током маја 2016. године. Добијени резултати помогли су да се оцене елементи водног биланса и формирају подлоге за оконтуривање зона санитарне заштите изворишта, док ће наредни корак бити делинеација унутрашњих сливова ове међуграничне издани којој припадају врела Сељашнице, Бучје и Брезница.

Кључне речи: карст, подземне воде, трасирање, Пријепоље

УВОД

Подручје истраживања налази се у југозападној Србији на око 300 km од Београда и припада општини Пријепоље (слика 1). Хидрогеолошким истраживањима током периода 2015–2017. године обухваћени су терени карстног платоа Бабине, чији се један део налази у Црној Гори, чиме ова област и формирана карстна издан имају и међугранични карактер.



Слика 1. Географски положај и рељефна карта карстног платоа Бабине
Figure 1. Location map and topography map of studied area – karst plateau Babine

Област карактерише измењено медитеранска клима са континенталном средњоевропском климом (планинска и алпска изнад 1000 и 1800 m и континентална са елементима жупске климе на нижим висинама). На карстној површи Бабине, која се налази на надморској висини од око 1150 m.n.m., влада планинска, тј. алпска клима, док у долини Лима (источни и југоисточни обод платоа), са надморским висинама од око 450–500 m.n.m., преовлађује жупска клима (Драговић, 2004).

У морфолошком погледу, шире подручје истраживања уоквирују Камена гора на југу и истоку и Златар на североистоку, док на југу плато прелази у Црну Гору, где морфолошку границу представља десна страна долине реке Ђехотине. Западну границу платоа у Србији чини долина Бучјевске реке (која повремено има клисураст изглед) и у наставку река Љутина, а у Црној Гори река Ђехотина и изворишта њених десних притока у овом делу Пљеваљског басена.

Непосредно подручје истраживања карактерише изражена морфолошка целина – карстна површ Бабине. Карстну површ Бабине Цвијић (1924) дефинише као дислоцирану сведену површ формирану преко наслага тријаских карбоната.

На површи се среће велики број површинских и подземних карстних облика (слика 2). Најбројнији карстни ерозиони облици су вртаче. Димензије вртача су од неколико метара до неколико десетина метара у пречнику. Мада су вртаче распрострањене по целом платоу, њихова највећа густина је дуж пограничног појаса Србије и Црне Горе. Карстни процес је посебно изражен на површи Љаљиновац, где је забележено неколико поткапина и повремено активних понора.

Запажају се добро скаршћене и дезинтегрисане речне долине. Предиспониране су раседима, који су знатно допринели брзом процесу карстификације. На карстној површи Бабине на територији Србије запажа се више скаршћених долина, а две највеће налазе се изнад врела Сељашнице (правца пружања југозапад–североисток) и у залеђу врела Бучје (правца пружања југозапад–североисток). На територији Црне Горе најмаркантнија је дуга сува долина у залеђу врела Брезница (Бездан), правца пружања исток–запад. Једини стални водоток на северозападном делу површи јесте речица Тмуша, која понире у велики пећински отвор у дну високе кречњачке преграде, која је условила формирање ове следе долине. Површински ток Швабара на источном ободу платоа, чији је изворишни део у насељу Јабука, такође понире након 1,5 km отвореног тока.

Понори са активном хидрогеолошком функцијом регистровани су на подручју села Јабука (понор Швабаре) и између села Крњача и Бучје (понор Тмуше).



Слика 2. Крај суве долине, локалност Горње Бабине
Figure 2. The end of dry valley in locality Gornje Babine

ОСНОВНЕ ГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ИСТРАЖНОГ ТЕРЕНА

Истражно подручје у геолошком погледу припада области Унутрашњих Динарида, а изграђују га магматске, метаморфне и седиментне стене стваране од палеозоица до кватара.

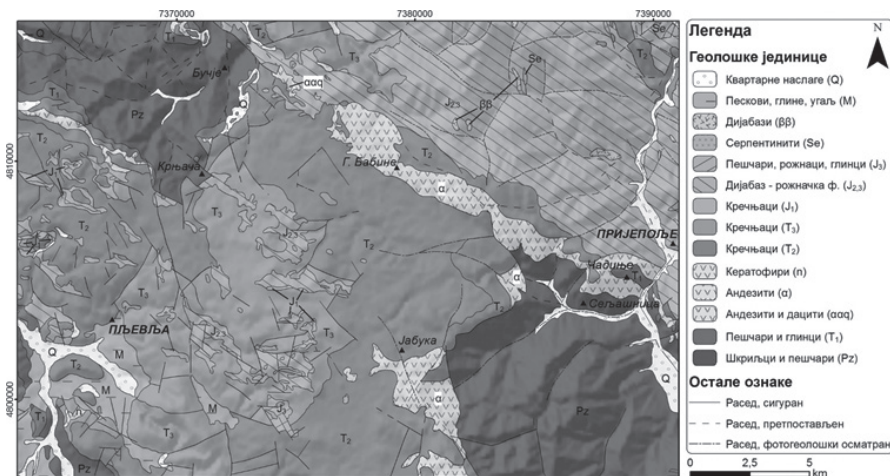
Палеозоик (Pz) је представљен серијом слабометаморфисаних седимената девона и карбона, а изграђен је од плочастих сивих и филитичних шкриљаца, лискуновитих пешчара и сивих кварцних пешчара са прослојцима слојевитих сивих песковитих кречњака и крупнозрних кварцних конгломерата (слика 3). Граница према серији пермотријаса је апроксимативна. Дебљина метаседимената серије девон–карбон се креће до 400 m. У више локалности карбонске стене пробијене су андезитима (Чадиње, Бабине, Сељане). Серија пермотријаса на северозападном делу терена изграђена је од пешчара, шкриљаца, алевролита са сочивима кварцних конгломерата и тањим сочивима и прослојцима сивих кречњака (Мирковић et al., 1980), дебљине око 500 m.

Мезозојске стене имају највеће распрострањење на истражном подручју. Заступљене су тријаске и јурске творевине.

Тријаске карбонатне стене су најзначајније са хидрогеолошког аспекта, с обзиром на то да су у њима акумулиране значајне резерве карстних изданских вода. На површини терена утврђено је присуство средњег и горњег тријаса. Укупна дебљина кречњака средњег тријаса је око 400 m, максимално 450 m. Углавном су представљени банковитим и масивним кречњацима, који су изразито карстификовани. Такође, у околини Сељана, у сливу Сељашнице, уочавају се слојевити и банковити кречњаци са муглама рожнаца. Ови кречњаци су углавном доломитични, а степен доломитизације обично расте ка вишим нивоима. Нерашчлањени горњи тријас (T_3) има значајно распрострањење на карстној површи Бабине у атару Јабукe. Представљен је спрудним кречњацима који су јако карстификовани, а у њима су пронађени рекристалисани остаци алги и фораминифера. Укупна дебљина кречњака на овом терену не прелази 400 m. Осим седиментних стена, током средњег тријаса била је веома интензивна магматска активност, када долази до изливања андезита, дацита и кератофира.

Западно од Јабукe, на територији Црне Горе, јављају се и доњојурске седиментне стене, у виду ерозионих заостатака откривених на малом простору. Поменута формација је у ерозионом односу са горњотријаским кречњацима. Изграђују их усложнени сиви кречњаци. Јура је на истражном подручју углавном представљена офиолитским меланжом ($J_{2,3}$), раније називаним дијабаз-рожномачком формацијом (Мирковић et al., 1980).

Творевине офиолитског меланжа имају веома велико распрострањење у околини Пријепоља. У односу на карстну површ Бабине, налазе се северно и североисточно. Дебљину је тешко одредити, али вероватно је већа од 500–600 m. У овој формацији јављају се дијабази ($\beta\beta$), ретко серпентинити (Se).



Слика 3. Геолошка карта истражног подручја (према ОГК СФРЈ, 1 : 100.000, листови Пријепоље, Пљевља, Жабљак и Бијело Поље)

Figure 3. Geological sketch map of study area (after Basic Geological Map of SFRY 1 : 100.000, sheets Prijepolje, Pljevlja, Žabljak, Bijelo Polje)

Миоценски језерски седименти (М) се могу уочити у југозападном делу терена, који је приказан картом, у околини града Пљевља (Пљеваљски угљени басен). У питању су језерски седименти (глине, пескови, лапорци и угаљ – лигнит), чија дебљина износи и до 230 m.

Квартарне творевине (Q) на истражном простору представљене су алувијалним наносима реке Лим и њене леве притоке Сељашничке реке. За алувијалне насlage је у речним коритима карактеристично смењивање шљунковитог, песковитог и чак глиновитог материјала. У речним коритима налазе се углавном шљункови и пескови. На неколико локација је уочено присуство сипарских и делувијалних седимената, који су мале дебљине.

Анализа неотектонске активности карстне површи Бабине указује да она у целини релативно тоне у односу на остале блокове, док се у њој запажају диференцијална кретања мањих блокова (Крешић, 1984). Најинтензивније се спушта терен у залеђу врела Сељашнице. Блок Сељашнице заправо представља ерозиони базис за највећи део подземних вода површи.

ОСНОВНЕ ХИДРОГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ИСТРАЖНОГ ТЕРЕНА

Врело Сељашнице повезано је са крупном раседном структуром, а чине га заправо два врела, на различитим котима и са супротних страна кањонске долине предиспониране поменутиим раседом. Врелски доводни канали у вези су са овим раседом и мањим пукотинама и раседима паралелног пружања (слика 4). Осим тога, ови раседи се поклапају и са неотектонски активним зонама које ограничавају блок Сељашнице. У неотектонски активној зони између блокова Гложанске реке и Бабина, поред врела Бучје, налазе се извор и понор речице Тмуше (веза између понора и врела Бучје доказана бојењем). Иначе, отвор понорске пећине Тмуше са својих близу 40 m висине један је од највећих у Србији (Крешић, 1984).

Према хидрогеолошким карактеристикама (Милојевић et al., 1976), на ширем истражном простору могу се издвојити следећи типови издани (слика 5): 1) збијени; 2) пукотински; 3) карстни тип издани. Поред тога, поједине геолошке формације сврстане су у условно безводне терене.

Алувијални наноси имају значајније распрострањење у плану и профилу у долини Лима, као и дуж реке Сељашнице. Подземне воде алувијалне издани су у хидрауличкој вези са површинским водама речних токова, што омогућује активно обнављање резерви подземних вода. Међутим, добра хидрауличка веза подземних и површинских вода, с друге стране, омогућава и лако загађивање подземних вода.

Пукотинска издан формирана је у вулканским стенама тријаске старости, које имају веће распрострањење у локалностима Јабука, Сељане, Чадиње, Доње и Горње Бабине. До формирања издани углавном долази у приповршинском јаче распаднотом делу масива.



Слика 4. Узводнији изворишни крак Сељашнице у периоду великих вода (лево) и повремени ток Жупањац (десно)

Figure 4. Uppermost appearance of Seljašnica karst spring in the period of high waters (left) and ephemeral stream Županjac (right)

Карстни тип издани је најзначајнији у погледу водоносности на простору платоа Бабине. Карстна издан формирана је у карбонатним стенама тријаске старости, које леже директно преко палеозојских шкриљаца. Најважнији вид прихрањивања ове издани је инфилтрација падавина. На деловима где су кречњаци откривени, издан се храни директном инфилтрацијом атмосферских вода и понирањем (табела 1) већег броја кратких површинских токова који се формирају на вулканитима. Површински ток Швабаре тече од места дифузног истицања и формирања, преко површи претворене у длатиште (локално названо „живо блато“) и долази до истоименог активног понора, у који је током маја 2015. године увирало око 6 l/s. Касније осматрене количине воде која је увирала, зависно од годишњег доба, износиле су од 5 до 20 l/s. У други велики понор Тмуше, на западном делу карстног платоа, увире воде истоименог површинског тока, чија је дужина краћа од тока Швабаре.

Пражњење, тј. дренарање карстне издани површи Бабине врши се преко више малих извора (табела 1 и слика 5), чија је средња издашност мања од

10 l/s, и три снажна карстна врела: Сељашница и Бучје у Србији и Брезница (Бездан) у Црној Гори.

Табела 1. Хидрогеолошке појаве на карстном платоу Бабине
Table 1. Hydrogeological objects, karst plateau Babine

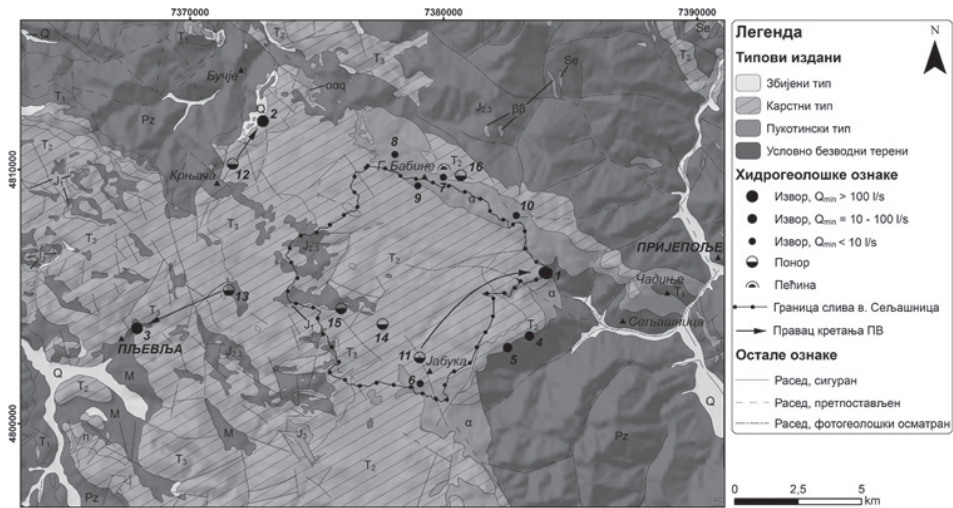
Р. бр.	Појава (локација)	Напомена	Р. бр.	Појава (локација)	Напомена
1	Врела Сељашнице	каптажа	9	Зеачка чесма (село Горње Бабине)	примитивна каптажа
2	Врело Бучје (село Бучје)	није каптирано	10	Извор Жупањак (Доње Бабине)	каптажа
3	Врело Брезница (Бездан)	каптажа	11	Швабара (село Јабука)	активан понор
4	Извор Рикавци (Звијезд)	каптажа и чесма	12	Тмуше (село Крњача)	активан понор
5	Извор Савина вода (Звијезд)	каптажа и чесма	13	Бегова Локва (село Каменско)	активан понор
6	Извор Швабара (село Јабука)	дифузно истицање	14	Брезовица (село Јабука)	активан понор
7	Извор Вељовине (село Горње Бабине)	није каптиран	15	Љаљиновац (село Јабука)	активан понор
8	Извор В(и)јогор (село Горње Бабине)	није каптиран	16	Вељовина (село Горње Бабине)	активан понор

Врела Сељашнице налазе се западно од Пријепоља (ознака 1 на слици 5). Истичу из тријаских кречњака карстне површи Бабине на контакту са андезитима. На блиском растојању истичу два врела чија сумарна издашност у минимуму износи око 150 l/s, што је утврђено и током осматрања издашности врела у периоду 2015–2017. године.

Врело Бучје (ознака 2 на слици 5) је једно од највећих врела у Динаридима Србије. Налази се северозападно од Пријепоља, на територији општине Прибој. Истиче на контакту тријаских кречњака и дијабаз-рожначке формације. Минимална издашност је већа од 200 l/s (слика 7) (Крешић, 1984, 1990).

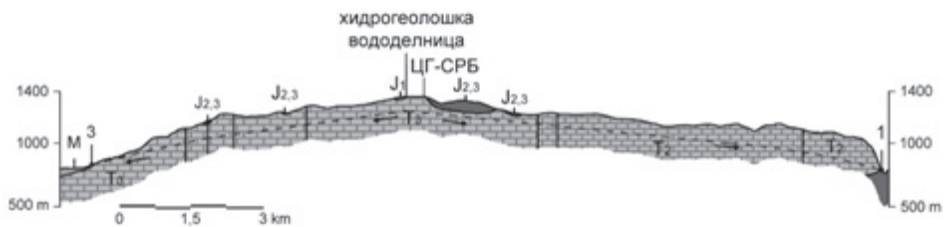
Врело Брезница (Бездан) налази се у Црној Гори у општини Пљевља (ознака 3 на слици 5). Истиче на контакту тријаских кречњака и миоценских наслага. Минимална издашност врела износи 35 l/s (Радуловић, 2000).

Поред поменутих великих карстних врела, део изданских вода дренира се и преко мањих извора по ободу површи. Једно од највећих врела на ободу Пљеваљског басена било је Тврдаш, чија је издашност у минимуму износила око 60 l/s. Данас је карстни канал који је допремао воду до врела „пресечен“ рударским радовима, па се сада подземне воде слободно уливају гравитационим путем у површински коп угља.



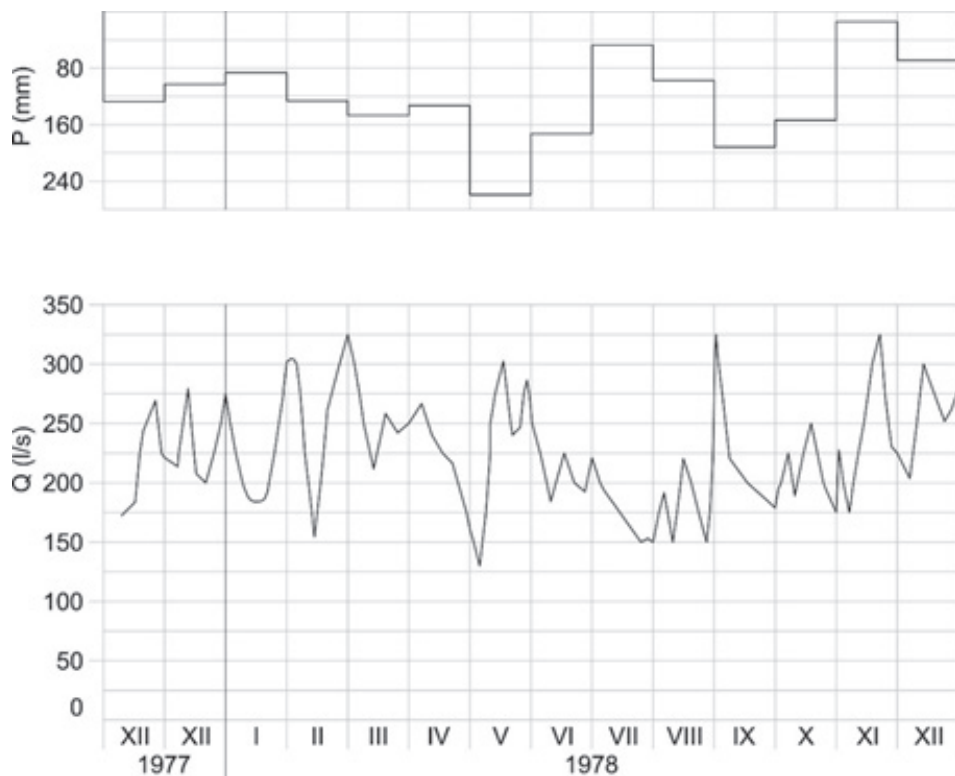
Слика 5. Хидрогеолошка карта истражног подручја – карстни плато Бабине, ознаке појава у табели 1

Figure 5. Hydrogeological sketch map of studied area – karst plateau Babine, name tags of objects in the Table 1



Слика 6. Хидрогеолошки прогнозни пресек терена: Брезница (3) – Сељашница (1), ознаке и боје као на слици 5

Figure 6. Hydrogeological cross-section of the terrain: Breznica-3 – Seljašnica-1, markings and colours as in figure 5



Слика 7. Хидрограм врела Бучје, 1977–1978. година (према подацима Геозавода, из Крешић, 1984)

Figure 7. Hydrograph of Bučje karst spring for the period 1977–1978 (after Geological Survey of Serbia, from Krešić, 1984)

Истраживањима која су вршена у другој половини XX века утврђено је постојање хидрогеолошке повезаности неких понора и врела на карстној површи Бабине. Обележавање понора у ранијем периоду извршено је на неколико локалитета.

Опит обележавања понора Тмуше (ознака 12, слика 5) на карстној површи Бабине (Мијатовић и Павловић, 1974) обављен је са 50 kg натријум-флуоресцеина (слика 8). Боја је убачена у понор 22. новембра 1974. године у 11 часова. Боја се појавила на врелу Бучје 23. новембра 1974. године у 23 часа и 30 минута (Мијатовић и Павловић, 1974, из: Крешић, 1984); регистровано је да је чак 95,5% обележивача истекло на врелу. Висинска разлика између понора и врела износи 250 m, раздаљина 2450 m, док је фиктивна брзина износила 1,8 cm/s.



Слика 8. Дијаграм истицања обележивача на врелу Бучје (Крешић, 1984)
 Figure 8. Breakthrough curve of recorded tracer at the Bučje spring (after Krešić, 1984)

Опит обележавања понора Бегова Локва (ознака 13, слика 5), који се налази на растојању 4000 m од врела Брезница (Бездан), са висинском разликом од 500 m, изведен је 15. маја 1961. године. Обележивач се појавио на врелу Брезница уз прорачунату фиктивну брзину подземних вода од 31,7 cm/s (Крешић, 1984; Радуловић, 2000).

Радуловић (2000) наводи и податке о резултатима обележавања изданских токова 1974. године, који су имали за циљ утврђивање услова оводњености лежишта угља у Пљеваљском басену. Дана 16. маја 1974. године обојен је понор Студенице на Јабуци; обележивач се јавио на врелу Тврдаш након 4 дана. Висинску разлику од око 300 m на удаљености од 7 km издански ток је савладао крећући се фиктивном брзином од 2,3 cm/s. Бојење понора Превија 23. маја 1974. године (Радуловић, 2000) такође је резултирало појавом трасера на врелу Тврдаш. Растојање од 8,1 km издански ток је превалио за 4 дана крећући се фиктивном брзином од око 2,52 cm/s.

РЕЗУЛТАТИ НОВИЈИХ ИСТРАЖИВАЊА У ПЕРИОДУ 2015–2017. ГОДИНЕ

Режим подземних вода изворишта Сељашница прати се континуирано од маја 2015. године. Осматране су осцилације нивоа подземних вода и количина захваћених вода, са свакодневним мерењем водостаја на новоформираном мерном профилу Сељашничка река и мерењем захваћених вода у постројењу

за пречишћавање сирове воде и потом дистрибуираних ка градској мрежи Пријепоља.

У циљу дефинисања узајамног односа количина падавина и других елемената режима и водног биланса, анализирани су месечне суме падавина за исти осматрачки период са падавинских станица Нова Варош, Душманићи и Крњача. С друге стране, температуре ваздуха су прикупљане само са најближе климатолошке станице Сјеница. Месец са најмањим количинама падавина у виду кише за време спроведених хидрогеолошких истраживања био је децембар 2015. године (Душманићи), када је пало само 1,4 mm кише, а новембра и децембра 2015. године (Крњача) није било падавина у виду воденог талога, већ само у виду снега. Месец са највећом количином падавина је био март 2016. године (Душманићи), када је пало 171,1 mm талога и март 2015. године (Крњача), када је пало 139,7 mm, односно Нова Варош, када је пало 163 mm кише током јула 2016. године. Средња месечна температура ваздуха у осматраном периоду кретала се у границама од $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (јануар 2015. године) до $18,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (јул 2015. године). Хидрометријска мерења спроведена су периодично при различитим водостајима, како би се формирала прецизна крива зависности $Q = f(H)$.

Анализа прикупљених података је омогућила да се стекне увид у функционисање карстне издани, која се дренира на Сељашничким врелима. Са дијаграма (слика 9) који приказује хистограм падавина за кишомерну станицу Крњача у периоду мај 2015 – април 2017. године и хидрограм истицања врела Сељашнице у истом периоду може се видети да је максимална вредност издашности износила $Q_{\max} = 7,03\text{ m}^3/\text{s}$ (8. марта 2016. године), док је минимална вредност износила $Q_{\min} = 0,14\text{ m}^3/\text{s}$, (6. октобра 2015. године). Коефицијент хидродинамичке неравномерности врела Сељашнице (Q_{\max}/Q_{\min}) износи 50, што говори о великој флукуацији истицања током осматраног периода. Средњегодишња издашност врела у периоду осматрања мај 2015 – април 2017. износи $Q_{\text{av}} = 0,96\text{ m}^3/\text{s}$.

На основу хидрограма издашности Сељашничких врела за 2015. и 2016. годину урађена је анализа рецесионог периода методом тарисмана, применом полазне једначине Мејеа (Maillet) (1):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1)$$

где су:

Q_t – издашност извора (m^3/s) у периоду $t-t_0$

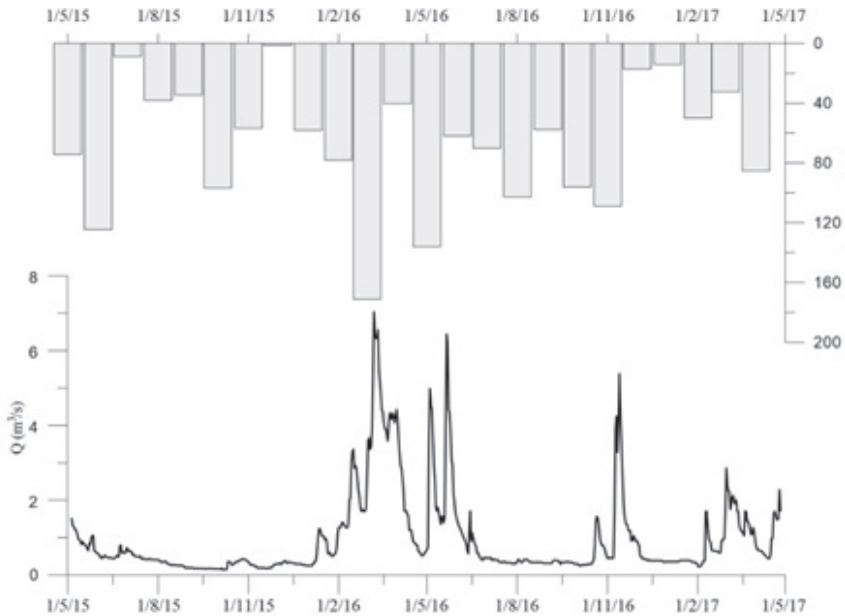
Q_0 – издашност извора (m^3/s) у периоду t_0

t_0 – почетак рецесионог периода (или почетак микрорежима пражњења)

t – крај рецесионог периода (крај микрорежима пражњења)

α – коефицијент пражњења издани током рецесије

e – база природног логаритма.

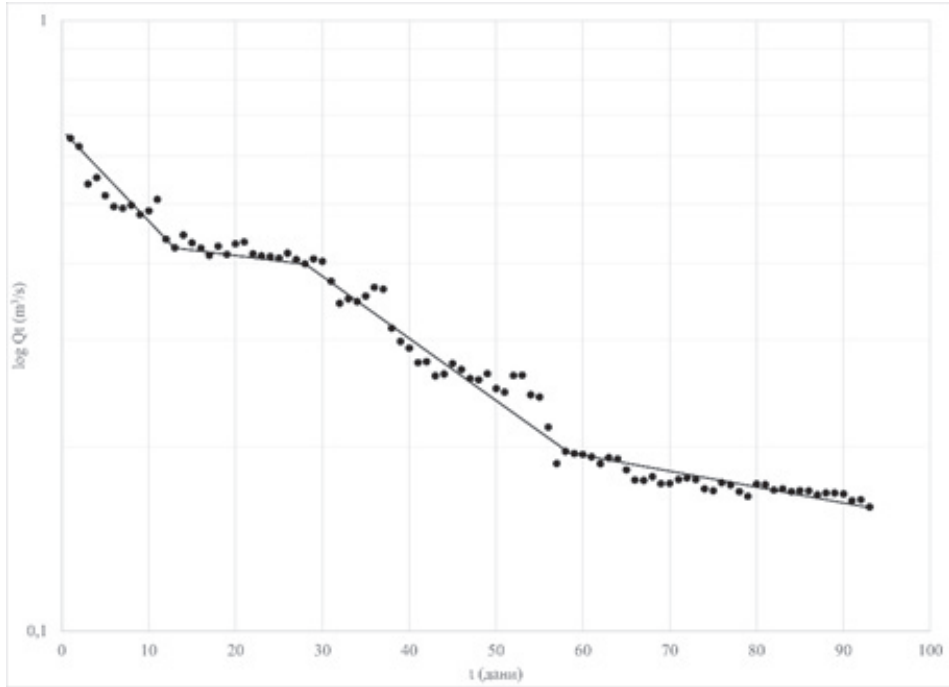


Слика 9. Упоредни дијаграм падавина и истицања Сељашничких врела
Figure 9. Correlation diagram of Seljašnica spring discharge and precipitation

Анализом криве рецесије утврђено је да је рецесиони период доста дуг и износио је 93 дана у 2015. години (од 4. јула до 4. октобра), односно 121 дан у 2016. години (од 16. јуна до 14. октобра) (слике 10 и 11). На почетку рецесионог периода одвија се пражњење динамичких резерви, виших, примарних карстних канала. Након тога, током периода малих вода, иако долази до делимичног прихрањивања издани услед кишних епизода, инфилтрирана вода највише одлази на земљишну влагу, засићење карстног система, као и попуњавање резерви, а на врелу доминира базни отицај уз спорадично повећање издашности. На тај начин могуће је дефинисати скоро тромесечни рецесиони период, након чега, услед интензивнијих и обилнијих киша, долази до попуне динамичких резерви, повећања ефективне инфилтрације, а самим тим и повећања издашности врела.

Важно је истаћи да се први микрорежим пражњења по правилу не покорава Мејеовој једначини рецесионог периода, будући да представља турбулентни режим течења, за који постоје други поступци одређивања релевантног коефицијента пражњења (Malik, 2015). Такође, треба напоменути да прави рецесиони период без активног прихрањивања заправо и не постоји, будући да је током периода рецесије било кишних епизода које су свакако имале утицај на укупну издашност Сељашничких врела. Међутим, оне се могу углавном занемарити, јер је са хидрограма уочљиво да нису утицале на

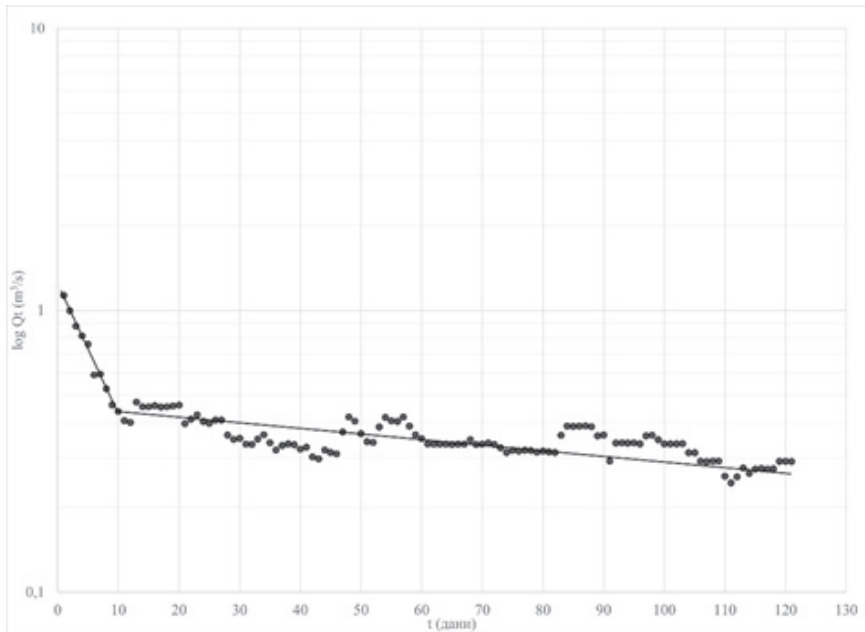
битно повећање издашности, већ су имале функцију попуњавања истеклих динамичких резерви (тзв. стабилизацију).



Слика 10. Семилогаритамски дијаграм пражњења врела Сељашнице током рецесије 2015. године

Figure 10. Semi-log diagram of drainage of karstic source Seljašnica during recession period of 2015

За анализиране 2015. и 2016. године уочљив је сложени режим истицања током периода рецесије. Рецесиони дијаграм се карактерише са 4 микрорежима пражњења, која су трајала 13, 15, 30 и 35 дана у 2015, односно са 2 микрорежима пражњења која су трајала 10, односно 111 дана у 2016. години. Коefицијенти пражњења издани током рецесије дати су у табели 1. Чињеница о различитости функционисања истог физичког система у карсту под утицајем режима падавина и, самим тим, различитости појаве броја микрорежима пражњења током рецесије у узастопним годинама, позната је у литератури (Мијатовић, 1968; Милановић, 1979; Крешаћ, 1991; Стевановић, 1991; Bonacci, 1993; Padilla et al., 1994; Kresic, 2009; Fiorillo, 2014).



Слика 11. Семилогаритамски дијаграм пражњења врела Сељашнице током рецесије 2016. године

Figure 11. Semi-log diagram of drainage of karstic source Seljašnica during recession period of 2016

Имајући у виду специфичан режим пражњења издани, било је неопходно применити апроксимацију једначине (1) и развити је у вишечлани низ, што је представљено једначином (2) (Милановић, 1979):

$$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + \dots + Q_{0n}e^{-\alpha_n t} \quad (2)$$

Табела 2. Коefицијенти рецесије за врело Сељашница у 2015. и 2016. години
Table 2. Recession coefficients of karst spring Seljašnica during 2015 and 2016

Година	Вредност α		Трајање микрорежима (у данима)
2015	α_1	0,032	13
	α_2	0,004	15
	α_3	0,023	30
	α_4	0,0059	35
		Σ	93
2016	α_1	0,089	10
	α_2	0,0057	111
		Σ	121

Као што се из претходне анализе види, рецесиони период врела Сељашнице траје доста дуго, око 3,5 месеца, с тим да је нешто дуже трајао у 2016. години него у 2015. години. При томе, чињеница да је у 2015. остварено $\alpha_3 > \alpha_2$ донекле оспорава валидност примењеног поступка интерференције микрорежима пражњења и резултат је у међувремену палих киша и инфилтрације „свежих“ вода. То тренутно засићење карстне издани током рецесионог периода условљава нову фазу држег истицања, највероватније услед преносења притиска кроз цео систем, након чега систем поново улази у период спорог пражњења. Када је реч о 2015. години, коефицијенти пражњења реда величине 10^{-2} (α_1 и α_3) говоре о бржем истицању подземне воде, вероватно активирањем виших канала, док коефицијенти пражњења реда величине 10^{-3} (α_2 и α_4) репрезентују спорије базно отицање из секундарних, мањих канала и матрикса. На исти начин анализиран је период рецесије Сељашничких врела за 2016. годину. Рецесиони период током 2016. године дефинисан је са два микрорежима пражњења, укупног трајања 121 дан. Први микрорежим трајао је 10 дана, током кога је дошло до брзог истицања динамичких резерви након периода великих вода, тако да је коефицијент пражњења износио $\alpha_1 = 0,089$. Након тога, улази се у дужи период базног истицања, без значајнијег утицаја ефективне инфилтрације на режим карстних подземних вода. Овај период је трајао 111 дана, а коефицијент пражњења износи $\alpha_2 = 0,0057$. Дужина рецесионог периода и количина воде која је истекла током њега говори о великом резервоару карстних вода акумулираних у карстној издани Сељашнице, будући да издашност током периода рецесије није била испод 175 l/s.

Рецесионом анализом могуће је утврдити запремину истекле воде током рецесионог периода применом следеће формуле (Мијатовић, 1968):

$$V_{isteklo} = \left(\frac{Q^*}{\alpha_n} - \left(\frac{Q_1}{\alpha_1} + \frac{Q_2}{\alpha_2} + \frac{Q_3}{\alpha_3} + \dots + \frac{Q_n}{\alpha_n} \right) \right) \quad (3)$$

где су:

$V_{isteklo}$ – укупна запремина истекле воде током рецесионог периода

Q^* – издашност на крају периода рецесије

$Q_{1,2,3,n}$ – укупна издашност током сваког микрорежима пражњења

$\alpha_{1,2,3,n}$ – коефицијенти рецесије за сваки микрорежим пражњења.

Коришћењем једначине (3) израчуната је запремина истекле воде током рецесионог периода истицања Сељашничких врела у 2015. години, која износи $2,31 \times 10^6 \text{ m}^3$, док је у 2016. години запремина истекле воде износила $5,68 \times 10^6 \text{ m}^3$.

ТРАСИРАЊЕ (ОБЕЛЕЖАВАЊЕ) ТОКОВА ПОДЗЕМНИХ ВОДА У СЛИВУ СЕЉАШНИЧКИХ ВРЕЛА

За потребе одређивања сливне површине Сељашничких врела, праваца кретања и истицања подземних вода, хидрауличке везе површинских и карстних изданских вода, одређивања времена путовања загађујућих супстанци ка изворишту, као и могућности загађивања и заштите подземних вода изворишта Сељашница, изведен је опит обележавања маја 2016. године, који је допринео да се потврди постојање хидрогеолошке повезаности понора Швабаре и врела Сељашнице. С обзиром на то да локални Завод за јавно здравље није издао сагласност о коришћењу натријум-флуоресцеина за извођење опита, као обележивач/трасер употребљена је кухињска со (NaCl), са којом резултати нису увек потпуно поуздани. Тако се не може са сигурношћу утврдити да ли је сва количина обележивача истекла из система, имајући у виду високу растворљивост соли и апсорпциони капацитет издани и седимената наталожених у карстним каналима.

Опит трасирања подземног тока на карстном платоу Бабине извршен је 2016. године, тако што је трасер у виду кухињске соли убачен у понор Швабаре, 11. маја у 10 часова. Минималне варијације издашности врела у периоду 10–15. мај 2016. године, као и периоди без падавина и са очекиваном температуром ваздуха за наведени период године, одговарали су извођењу опита. Припрема кухињске соли као трасера обављена је у већим судовима познате запремине методом мешања до потпуног растварања соли (слика 12), након чега се приступило наливању трасера у понор Швабаре (слика 12). У тренутку наливања у понор Швабаре, на карстном платоу, увирало је око 20 l/s, док је након наливања трасера из цистерне у понор инјектирано додатних 9 m³ чисте воде. Наливање раствореног трасера је завршено истог дана у 11 часова, а укупно је убачено 500 kg NaCl (слика 13).

Осматрање специфичне електропроводљивости (E_c) вршено је помоћу преносног уређаја – кондуктивиметра (WTW Cond 340i SET). Мерења помоћу уређаја су вршена на следећим осматрачким пунктовима: врела Сељашнице (почетна вредност E_c износила је 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$) и изворима Савине воде и Рикавци (ознаке 5 и 4 на слици 5, респективно). Мерења специфичне електропроводљивости отпочела су дан раније, 10. маја 2016. године у 12 часова, и вршена су сваког сата на врелима Сељашнице, док су на изворима Савине воде и Рикавци мерења вршена на два, односно четири сата.



Слика 12. Припрема трасера (NaCl), понор Швабаре, мај 2016. године
Figure 12. Preparation of NaCl used as tracer for the test conducted at ponor Švabare (Babine plateau), May 2016



Слика 13. Наливање трасера у понор Швабаре, мај 2016. године
Figure 13. Injection of tracer into ponor Švabare, May 2016

Ритам мерења специфичне електропроводљивости на врелима Сељашнице се није мењао све до значајног повећања вредности E_s (појава трасера), 13. маја у 15 часова, када је електропроводљивост износила $407 \mu\text{S}/\text{cm}$ (слика 14).

Након појаве трасера, мерење Ес је вршено сваких 15 минута до поноћи 14. маја, након чега се прешло на полчасовна осматрања, све до 11 сати наредног дана, када је мерење настављено сваког сата. За престанак истицања трасера на врелу сматра се 15. мај у 1 час после поноћи, када је вредност електропроводљивости износила $380 \mu\text{S}/\text{cm}$. Имајући у виду време које је протекло од убацивања трасера у понор до појаве трасера на врелу, могуће је израчунати фиктивну брзину кретања подземног тока. Најкраће праволинијско растојање између понора Швабаре и врела Сељашница износи 6 km, а поменути временски интервал 53 h, тако да виртуелна брзина кретања карстних подземних вода карстног платоа Бабине износи $3,14 \text{ cm}/\text{s}$. Ова вредност у великој мери кореспондира са резултатима претходних опита обележавања, који су вршени на карстном платоу Бабине, али и у области Унутрашњих Динарида (Крешић, 1982; Радуловић, 2000). Појављивање обележивача, тј. кухињске соли, није регистровано на другим осматрачким пунктовима (поменути Рикавци и Савина вода), што може указати на постојање једног привилегованог правца кретања подземних вода у оквиру карстне издани платоа Бабине.



Слика 14. Дијаграм истицања обележивача NaCl на врелу Сељашнице, мај 2016.

Figure 14. Breakthrough curve of NaCl tracer registered at Seljašnica spring during experiment in May 2016

На основу средње вредности електропроводљивости и вредности минималне и максималне флукуације електропроводљивости забележене

током трајања опита, срачуната је количина истеклог обележивача. Користећи стандард америчке Агенције за животну средину (US EPA) при прерачунавању вредности електропроводљивости из $\mu\text{S}/\text{cm}$ у mg/l , срачуната је количина соли истекла на врелу током трајања опита и она износи $1,5 \text{ kg NaCl}$, што је свега $0,3\%$ од укупне тежине убаченог обележивача. Овде треба имати у виду да је врло могуће да је растварање кухињске соли било непотпуно приликом убацивања у понор и да је дошло до таложења нераствореног трасера по дну канала и у седиментима. Такође, извесна количина је вероватно остала заробљена у секундарним порама, каналима и сифонима.

Основна потешкоћа приликом детекције раствореног трасера (изабраног NaCl) односи се на чињеницу да је неопходно јасно детектовање почетка таласа трасера, у обиму већем од 10% у односу на почетну вредност. Оно што делом обавезује на критички осврт на спроведени опит трасирања јесу варијације специфичне електропроводљивости, које су постојале приликом мерења, као и чињеница да није дошло до комплетног повратка на претходно стање.

ЗАКЉУЧАК

Карстни плато Бабине налази се на територији југозападне Србије и делом северне Црне Горе и представља површ формирану на дебелим наслагама тријаских карбоната, чија се дебелина креће и до 750 m . Најбројнији карстни облици су вртаче и суве долине са висећим ушћима изнад активних водотокова, као и следе долине које сведоче о некада добро развијеној речној мрежи. На површи постоји и већи број понора и мањих пећина. Карстна издан формирана је у карбонатним стенама доњег и средњег тријаса, а њено прихрањивање одвија се инфилтрацијом вода од падавина и мањих површинских токова – понорница. Пражњење, тј. дренарање карстне издани површи Бабине врши се преко три снажна карстна врела: Сељашница и Бучје у Србији и Брезница (Бездан) у Црној Гори, као и већег броја извора чија средња издашност не прелази 10 l/s .

Први резултати новијих истраживања указују на постојање два сегмента карстног система: виши, примарни – који се релативно брзо празни и испоручује велике количине воде врелима Сељашнице током периода високих вода (Q до $7 \text{ m}^3/\text{s}$), и нижи, секундарни – који се дуже и спорије празни и омогућава просечно истицање у периоду рецесије, који траје и до 3 месеца, када издашност врела износи $0,3\text{--}0,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Изведени опит трасирања подземних вода, током којег је као трасер коришћена растворена кухињска со (NaCl) наливена у понор Швабаре, био је делимично успешан у доказивању постојања подземне везе понора и врела. Такође, имајући у виду све недостатке које су уочене током извођења и анализе резултата опита (степен растворљивости соли, прецизна детекција појаве трасера и повратка на стање пре ињектирања

трасера и др.), опит је ипак успешно указао на то да вероватно постоји привилеговани правац кретања подземних вода у оквиру карстне издани, будући да је појава трасера детектована само на Сељашничким врелима, а не и на другим осматраним изворима – Рикавцима и Савиним водама. Имајући у виду праволинијско растојање понора и врела (6 km) и време које је протекло од тренутка убацивања трасера у понор до тренутка његове појаве на врелу (53 часа), одређена је фиктивна брзина кретања подземних вода карстне издани Бабине, која износи 3,14 cm/s.

Даљим истраживањима на овом простору планирано је да се прецизно одреде границе хидрогеолошких сливова између три велика карстна врела, као и вредности ефективне инфилтрације, што ће омогућити рационалније коришћење овог значајног међуграничног подземног водног ресурса.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bonacci O, 1993: *Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers*, Hydrological Sciences Journal, 38:1, 51–62, DOI: 10.1080/02626669309492639
- Драговић Р, 2004: *Полимље (Природа-Туризам-Одрживи развој)*. Српско географско друштво, Београд, стр. 176.
- Крешћић Н, 1982: *Прилози познавању хидрогеолошких карактеристика карста Зајадне Србије*. Зборник X јубиларног конгреса геолога Југославије, књ. 3, Будва.
- Крешћић Н, 1991: *Квантитативна хидрогеологија карста са елементима квалитативне подземних вода*, Научна књига, Београд.
- Крешћић Н, 1984: *Хидрогеологија карстних терена у сливу Дрине узводно од Бајине Башће на територији СР Србије*. Магистарски рад, Рударско-геолошки факултет, Београд (непубликовано).
- Крешћић Н, 1990: *Карстни хидрогеолошки систем врела Бучје и могућности његовој коришћења*. Наш Крш, XVI, 28–29, Сарајево, 91–98.
- Kresic N, 2009: *Groundwater resources: Sustainability, Management, and Restoration*, McGraw-Hill, USA.
- Malik P, 2015: *Evaluating Discharge Regimes of Karst Aquifer*. In: Stevanović Z. (eds) *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. Professional Practice in Earth Sciences. Springer, Cham.
- Мијатовић Б, 1968: *Методика испитивања хидродинамичкој режима крашких издани помоћу анализе криве изражјења и флукуације нивоа издани у рецесионим условима*, Весник Геозавода, Серија Б, књ. VIII, стр. 43–81.
- Мијатовић Б, Павловић П, 1974: *Регионална хидрогеолошка истраживања подручја Зајадне Србије*. Фонд стручне документације Геозавода, Београд.
- Милановић П, 1979: *Хидрогеологија карста и методе испитивања*. Хидроелектране на Требишњици, Институт за кориштење и заштиту вода на кршу, Требиње, стр. 1–307.
- Милојевић Н. и сарадници, 1976: *Геологија Србије*, књ. VIII-1, *Хидрогеологија*. Завод за регионалну геологију и палеонтологију, Београд.

- Мирковић М, Пајовић М, 1980: *Тумач за основну геолошку карџу, лисџ Пљевља*, 1 : 100.000. Савезни Геолошки Завод, Београд.
- Padilla A, Pulido-Bosch A, Mangin A, 1994: *Relative Importance of Baseflow and Quickflow from Hydrographs of Karst Spring*, Groundwater, Vol. 32, Issue 2, pp. 267–277.
- Радуловић М, 2000: *Хидрогеолоџија карсџа Црне Горе*. Републички завод за геолошка истраживања, Поседна издања Геолошког гласника, Књига XVIII, Подгорица, стр. 1–271.
- Стевановић З, 1991: *Хидрогеолоџија карсџа Карпато-Балканида источно Србије и мојћносџи водоснабдевања*, Поседна издања Рударско-геолошки факултет, Београд, стр. 245.
- Fiorillo F, 2014: *The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers*, Water Resources Management 28: 1781–1805, DOI: 10.1007/s11269-014-0597-z
- Цвијић Ј, 1924: *Геоморфолоџија I*, Државна штампарија Београд, стр. 1–588, Београд (Сабрана дела Јована Цвијића, *Геоморфолоџија I*, књ. 6, САНУ и Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, стр. 595)

*Branislav Petrović, Veljko Marinović, Zoran Stevanović, Saša Milanović,
Ljiljana Vasić*

GROUNDWATER REGIME OF THE BABINE KARST PLATEAU (SW SERBIA, PRIJEPOLJE)

S u m m a r y

The Babine karst plateau is located in western Serbia, about 300 km southwest of Belgrade and mostly belong to the municipality of Prijepolje (Figure 1). The karst plateau belongs to the territory of Serbia and partly to Montenegro, so the knowledge of the hydrogeological properties of studied cross-border area, is very important for both countries, which use these waters in their potable water supply (cities Prijepolje in Serbia and Pljevlja in Montenegro). The plateau is formed over the thick deposits of Triassic carbonates. The thickness of the carbonate complex varies from 150 to 750 m, possibly up to 1200 m, in bedrock of the ophiolites of Jurassic age. Large number of surface and underground karst features can be found on the plateau. There are also registered several ponors and smaller caves. However, the most frequent karstic forms are sinkholes and dry valleys with hanging paleo confluences above active streams, as well as blind valleys that testify to a well-developed paleo river network (Figure 2). The karst aquifer was formed in the carbonate rocks of the Triassic age (Figures 5, 6). The most important way of aquifer recharging is the infiltration of rainfall and melted snow. In bare karst areas, the karst aquifer is being recharged by the direct infiltration of atmospheric waters and by the sinking of many surface streams formed on ophiolites and young volcanic rocks (andesites and dacites). There are data on earlier tracing experiments (70s and 80s of 20th century) carried out on the karst plateau and its rims. The results of the groundwater tracing tests

indicate the existence of a connection between the ponor of the Begova Lokva (no. 13 on Fig. 5) on the southwestern edge of the area in Montenegro) and the spring Breznica (Bezdan) near Pljevlja (no. 3 on Fig. 5), and between the ponor of Tmuša (no. 12 on Fig. 5) and the spring of Bučje (no. 2 on Fig. 5, SZ rim of the plateau) (Figures 7, 8), while the tracing test of the Seljašnica karst spring (Figure 4; no. 1 on Fig. 5) has never been done before. Groundwater of the Babine karst plateau is discharging over three large karst springs: Seljašnica and Bučje in Serbia and Breznica in Montenegro (no. 1, 2 and 3 in Table 1 and Figure 5, respectively). The discharging of the Seljašnica karst spring have been continually measured since May 2015, so the maximum value was $7,034 \text{ m}^3/\text{s}$, and minimum value was $0,140 \text{ m}^3/\text{s}$, while the average yield for the period May 2015 – April 2017 is $0,958 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 9). The recession curve analysis of the Seljašnica karst spring have been done for 2015 and 2016, by using the Maillet's equations (1) and (2) (Figure 10 and 11). The results show complex way of discharging during the recession period, where 4 microregimes of discharging was determined in 2015 (duration of recession period was 93 days) and 2 microregimes of discharging in 2016 (duration of recession period was 121 days) (Table 2). Calculated recession discharge coefficients α (order of magnitude 10^{-2} and 10^{-3}) showed the two cycle of discharging in the recession period – the fast one and the slow one, depending on activation of primarily or secondarily karst channels and caverns. The volume of discharged water during the recession period was $2,31 \times 10^6 \text{ m}^3$ in 2015 and $5,68 \times 10^6 \text{ m}^3$ in 2016, calculated by using the equation (3). Besides the recession analysis, a tracer test of the Babine karst plateau has been done during the hydrogeological research. The connection between the Švabare ponor (no. 11 on Fig. 5, located in the area of the settlement Jabuka on the Babine karst plateau) and the spring Seljašnica (the eastern rim of the karst plateau) has been confirmed by tracing test done in May 2016. The experiment included use of salt (NaCl) as a tracer during “high” water period in 2016. The injection of 500 kg of NaCl into the Švabare ponor at Babine plateau was carried out on May 11 at 10 a.m. along with injection of additional 9 m^3 of clean water (Figures 12 and 13). The electrical conductivity has been measured hourly on the Seljašnica karst spring, and every 2 and 4 hours on Rikavci and Savine vode karst springs (no. 4 and 5 on Fig. 5). The tracer was recorded at the karst spring Seljašnica after 53 hours (on May 13 at 3 p.m.) (Figure 14), after which the electrical conductivity has been measured on every 15 minutes. Based on the rectilinear distance between the ponor and spring (which is 6 km) and the time between the injection and emerging of the tracer, it is possible to estimated karst groundwater fictitious velocity which is $0,0314 \text{ m/s}$. Further research on the Babine karst plateau will be performed in order to precisely determine the boundaries of the hydrogeological catchments' areas and effective infiltration, which will enable a more rational use of the transboundary groundwater resource.

Keywords: karst, groundwater, tracing, Prijepolje