

Геол. ан. Балк. полуос. Ann. Geol. Penins. Balk.	62	465–484	Београд, децембар 1998 Belgrade, Decembre 1998
---	----	---------	---

УДК 550.836.2:556.3.01:556.322.46(234.422.1)

Оригинални научни рад

## ХИДРОГЕОЛОГИЈА – HYDROGÉOLOGIE

### УТИЦАЈ ДУБОКЕ ЦИРКУЛАЦИЈЕ ХЛАДНИХ КАРСТНИХ ВОДА У СПОЉАШЊИМ ДИНАРИДИМА НА ГУСТИНУ ТЕРЕСТРИЧНОГ ТОПЛОТНОГ ТОКА

од

Михаила Миливојевића\*

На подручју Спољашњих Динарида констатована је регионална геотермална аномалија са веома ниским вредностима густине топлотног тока, 15–30 mW/m<sup>2</sup> (Миливојевић, 1992). Пространство ове аномалије се поклапа са пространством карстних терена, које износи око 20 000 km<sup>2</sup>. Ови терени сачињени су од карбонатних наслага мезозојске старости дебљине 6–8 km, које су интензивно карстификоване до дубине од око 5 km. У току геолошког времена карстификација је вршена у девет фаза (Milovanović, 1964/65). Услед дубоке циркулације метеорских, односно подземних вода, цео карстни терен Спољашњих Динарида је охлађен. Процес карстификације је рецентан од палеогена у целом овом подручју, а нарочито у задњих 2 000 година услед смањења вегетационог покривача. Због свега тога, до сада измерене вредности густине терестричног топлотног тока до дубине од 5 km у карбонатном комплексу мезозојске старости не одговарају стварним вредностима из дубљих делова земљине коре. Оне треба да се налазе испод зоне циркулације подземних вода у карбонатном комплексу, тј. у његовој подлози где нема активне циркулације, па ни конвекције топлоте која изазива поменути геотермалну аномалију (Miliwojevic, 1993). Према моделским испитивањима на геотермалном моделу земљине коре Спољашњих Динарида, реалне вредности густине терестричног топлотног тока у бази седимената треба да изнесе 40–50 mW/m<sup>2</sup>.

**Кључне речи:** геотермални топлотни ток, геотермална аномалија, карст, конвекција, хладне подземне воде, термалне воде, Спољашњи Динариди.

### УВОД

Густина терестричног или геотермалног топлотног тока је један од главних параметара за сагледавање или разумевање некадашњег, садашњег и будућег развоја наше планете. Највећи део мерења, односно одређивања густине топлотног тока врши се у бушотинама, које су плитке у односу на дебљину земљине коре и литосфере, иако им је дубина најчешће 1–5 km. Осматрања густине топлотног тока у веома дубоким бушотинама, у Немачкој и у Русији (полуострво Кола), су индцирала значајне разлике у његовим вредностима на дубинама од пар километара у од-

\* Рударско–геолошки факултет Универзитета у Београду, Ђушина 7, 11 000 Београд.

носу на неколико пута веће дубине. Уствари, после израде и мерења у овако дубоким бушотинама, чија је дубина већа од 10 km, утврђене су промене густине терестричног топлотног тока у вертикалној равни.

Најчешће коришћене бушотине за одређивање густине терестричног топлотног тока су релативно дубоке (1–3 km). Такве и још дубље бушотине су најпожељније за одређивање вредности овог параметра. На основу њих су израђене скоро све карте и атласи густине терестричног топлотног тока. Међутим, у неким од њих су регистроване али нису често приказане и дискутоване промене густине топлотног тока у вертикалној равни, тј. није увек вршена критичка анализа резултата нових мерења и реинтерпретација старих података.

На промене густине топлотног тока у вертикалној равни утичу промене климе, хидрогеолошке, неотектонске, структурне и друге карактеристике терена. Од њих су хидрогеолошке најзначајније.

Утицај хидрогеолошких карактеристика терена, односно појединих литолошких чланова и литостратиграфских јединица на геотермално топлотно поље је већи што је већа дубина, брзина и време циркулације слободних подземних вода. У том процесу подземне воде, настале од хладних атмосферских и површинских вода, хладе терен и истовремено се постепено загревају, а затим на другом месту, мање или више загрејане истичу на површ Земље. На тај начин подземне воде преносе огромне количине геотермалне топлоте из једног дела земљине коре у други, како у плану, тако и по дубини. Тај пренос се врши конвекцијом при чему се стварају аномалије густине топлотног тока.

Аномалије густине топлотног тока чији су главни узрок хидрогеолошке карактеристике терена најлакше се формирају у карстним теренима. Једна од њих се налази на подручју Спољашњих Динарида, односно у теренима динарског холокарста. Она има регионални карактер и пружа се од Истре, преко Лике, Далмације, Херцеговине и јужне Црне Горе до западне Албаније (сл. 1). Карактерише се веома ниским вредностима густине топлотног тока, које су 2–3 пута ниже од просечних за континентални део Европе. Ову аномалију је први описао Миливојевић (1992, 1993). У овом раду се даје објашњење њеног могућег порекла.

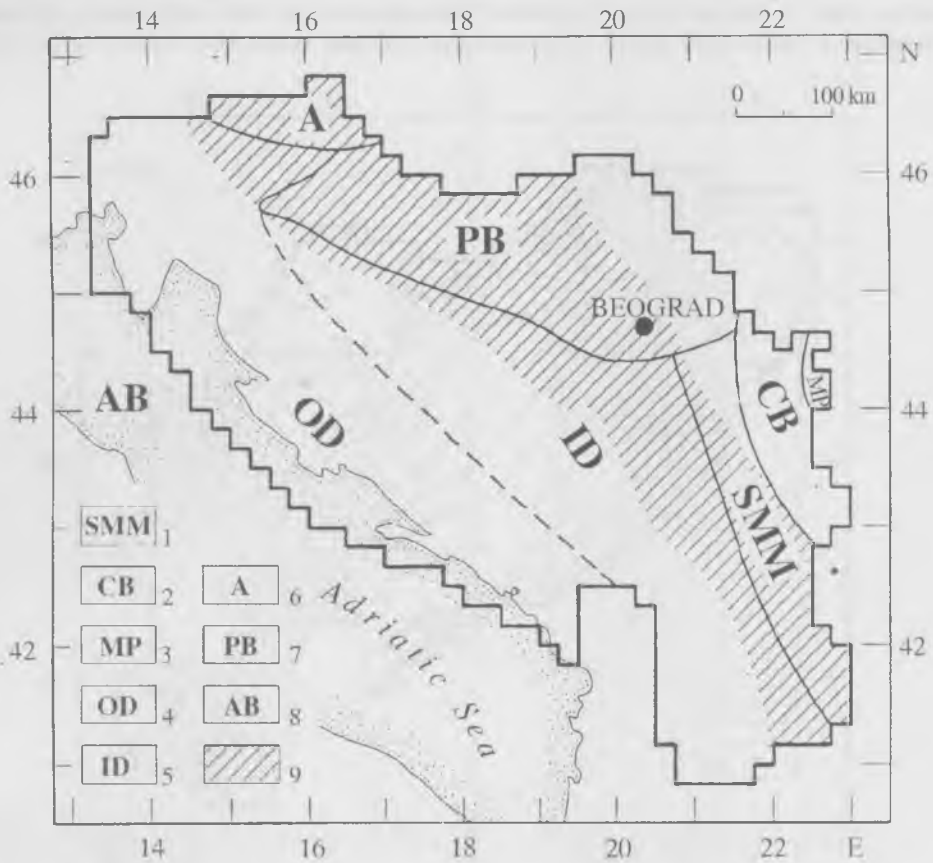
## ТОПЛОТНО ПОЉЕ СПОЉАШЊИХ ДИНАРИДА

Прва карта густине терестричног, тј. геотермалног топлотног тока Спољашњих Динарида (сл. 1), на којој је уочено присуство поменуте аномалије, израђена је у склопу израде прве карте густине топлотног тока бивше СФРЈ од стране Ravnik et al. (1987). Под геотермалним топлотним током треба подразумевати чисту кондуктивну компоненту која доспева из земљине унутрашњости у горњи део земљине коре, односно у "седиментни слој". За израду карте коришћени су резултати температурних мерења у изабраним дубоким бушотинама, укупно 138 на копну и 14 у Јадранском мору.

Од њиховог укупног броја 55 бушотина су биле дубље од 3 km, док је 37 бушотина било плиће од 1 km. Све бушотине на подручју Спољашњих Динарида биле су дубље од 1 km, односно све оне су изведене кроз мезозојски карбонатни, веома карстификовани комплекс и доспеле дубоко испод нивоа мора, најдубље и до, око, 5 km.

На подручју Спољашњих Динарида вредности густине терестричног топлотног тока су мање од  $40 \text{ mW/m}^2$ , највећим делом  $20\text{--}30 \text{ mW/m}^2$ , а местимично мање и од

20 mW/m<sup>2</sup>. Овакве вредности се сматрају аномално ниским, јер је просечна вредност за континентални део Европе око 60 mW/m<sup>2</sup>. Ниске вредности густине топлотног тока од 40–60 mW/m<sup>2</sup> су карактеристичне за стабилне делове земљине коре, тј. за штитове и платформе, тако да посматрано и са овог аспекта, наведене вредности у Спољашњим Динаридима ограничавају изразито аномално подручје.



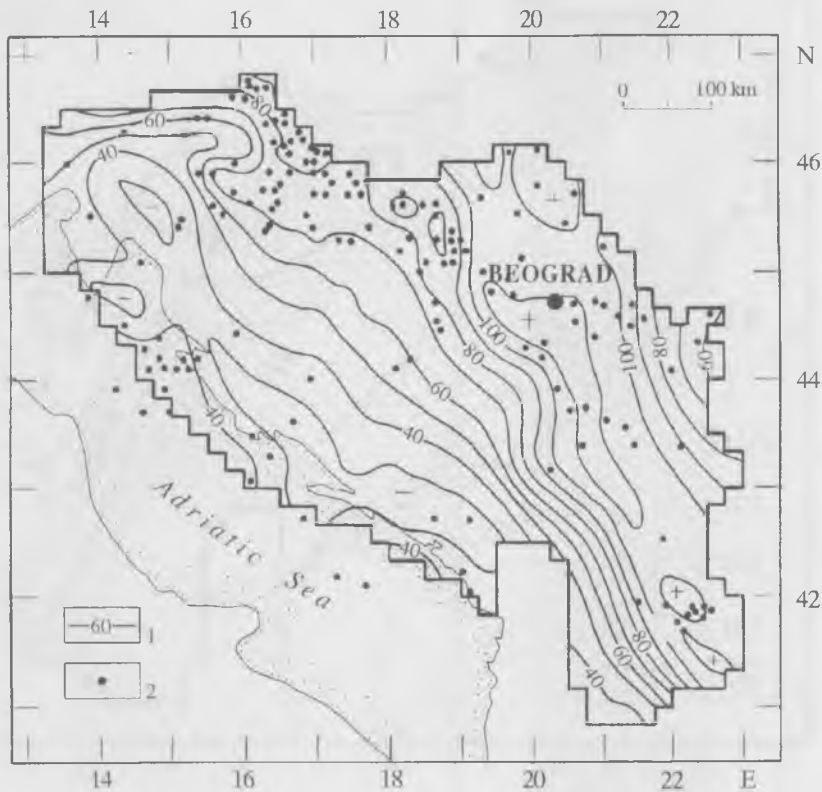
Сл. 1. Карта геотектонских јединица територије претходне Југославије (Grubić, 1980). Легенда: 1. Српско-македонска маса; 2. Карпато-балканиди; 3. Мезијска платформа; 4. Спољашњи Динариди; 5. Унутрашњи Динариди; 6. Алпи; 7. Панонски басен; 8. Јадрански басен; 9. зона неогене магматске активације.

Fig. 1. Map of geotectonic units in ex Yugoslavia (Grubić, 1980). Legend: 1. Serbian-Macedonian Massif; 2. Carpatho-Balkanides; 3. Mesian Platform; 4. Outer Dinarides; 5. Inner Dinarides; 6. Alps; 7. Panonian Basin; 8. Adriatic Basin; 9. Zone of Neogene magmatic activation.

Геотермална аномалија Спољашњих Динарида простире се, као што је наведено, од Истре, преко Далмације, Херцеговине, јужне Црне Горе, северне Албаније и крајњег западног дела Македоније до северне границе западне Грчке, односно њено пространство је веће од 20 000 km<sup>2</sup>. Због тога ова аномалија има велики значај који превазилази њене границе и тражи објашњење њеног могућег узрока да би се избегле нетачне геотермалне и друге интерпретације њених података.

## ГЕОТЕРМАЛНИ МОДЕЛ СПОЉАШЊИХ ДИНАРИДА И ЈАДРАНСКОГ БАСЕНА

Кретање подземних вода у земљиној кори је важан физички процес, не само у хидрогеолошком, већ и у геотермалном смислу, јер се у току њега врши редистрибуција топлоте. Због тога долази до промена вредности геотермалног температурног поља које са вредностима топлотне проводљивости стена дефинишу вредности геотермалног топлотног поља, тј. вредности густине топлотног тока. Такав случај



Сл. 2. Компјутерски израђена карта густине терестричног топлотног тока територије претходне СФРЈ на основу оригиналних карата Ravnik et al. (1987) и Milivojević (1989). Легенда: 1. Изолоније густине геотермалног топлотног тока ( $\text{mW/m}^2$ ); 2. Локације на којима је одређена вредност густине геотермалног тока.

Fig. 2. Computer produced map of the heat flow density for ex Yugoslavia based on original maps by Ravnik et al. (1987) and Milivojević (1989). Legend: Isolines of the heat flow density ( $\text{mW/m}^2$ ); 2. The localities on which the value of heat flow density has been determined.

је у теренима изграђеним од веома водопропустних стена, нарочито изражен у оним од дубоко карстификованих дебелих наслага кречњака и доломита. Овакво стање се среће у интерпретацијама геотермограма из бушотина у виду њихових карактеристичних облика или делова на основу којих се лако препознају ефекти кретања подземне воде. Геотермограми или делови геотермограма који такво стање одражавају се не користе за одређивање густине топлотног тока. Обзиром да је на подручју

Спољашњих Динарида релативно мали број дубоких бушотина, иако су избушене у карстном терену за којег се поуздано зна да је веома водопропустан, оне су коришћене за израду описане карте густине топлотног тока зато што других бушотина са температурно меродавним условима није било.

Холокарст у Спољашњим Динаридима има пространство од око 20 000 km<sup>2</sup>. По појавама карстификације он је одавно познат у свету и сматра се за класичан развој карста. У вези са тематиком овог рада значајна је његова еволуција и дубина. У том погледу најбоље објашњење даје рад Milovanovića (1964/65) "Епирогенетска и орогенетска динамика у простору Спољашњих Динарида и проблеми палеокарстификације и геолошке еволуције холокарста". У њему је приказана изванредна анализа и синтеза резултата свих дотадашњих геолошких, хидрогеолошких, палеогеографских и других резултата на простору Спољашњих Динарида. Између осталог, значај овог рада је и у томе што даје приказ геолошког модела терена који омогућује прихватљиво објашњење настанка поменуте рецентне геотермалне, уствари хидрогеотермалне аномалије Спољашњих Динарида.

По Milovanoviću (1964/65) главне генетске карактеристике динарског холокарста су следеће:

1. Динарски холокарст формиран је у генетски сложенем и дисконтинуираном процесу карстификације и састоји се, као комплексни геолошки и геоморфолошки феномен, од комбинације рецентног и стратиграфски различитих палеокарстева;

2. Карстификација у неким подручјима почела је већ у средњем тријасу. У многим областима, она је у мезозојку била активна у више наврата (спратови карстева) а у неким просторима непрекидно је у дејству још од краја горње креде;

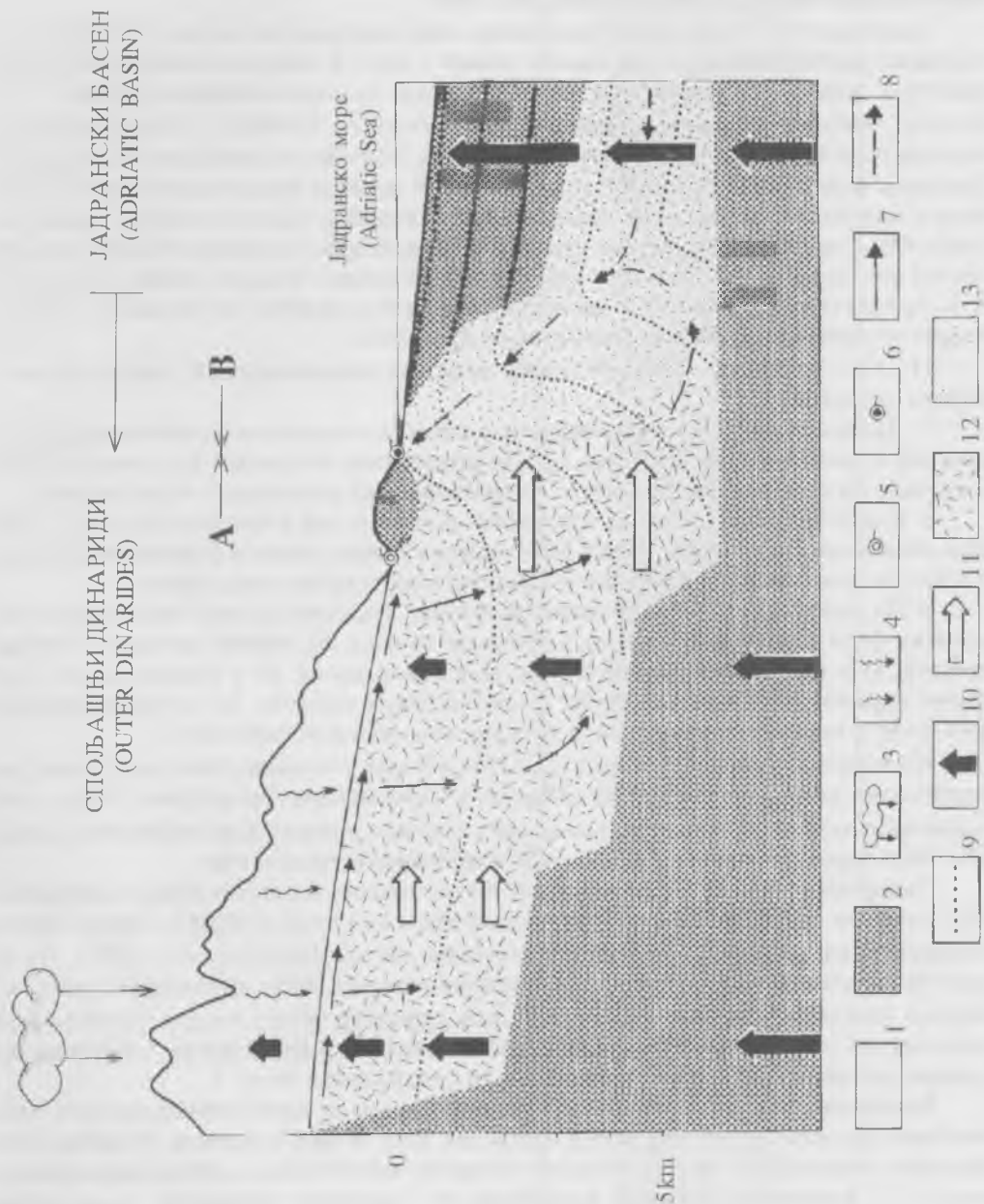
3. На основу доказа о палеокарстификацији издвојено је девет временских геолошких фаза карстификације: а) у средњем тријасу, б) између средњег и горњег тријаса, в) у горњем тријасу, г) у јури, д) у доњој креди, њ) у горњој креди, е) за време ларамидских епирогенетских и орогенетских покрета, ж) за време старопиринејских и пиринејских покрета, и з) за време савске и осталих фаза.

Из горње анализе Milovanovića (1964/65) може се закључити да је скоро цео карбонатни комплекс мезозојске старости у Спољашњим Динаридима, чија се дебљина процењује на 6–8 km, био веома дуго изложен процесу карстификације и да је због тога карстификован скоро до своје водонепропустне подлоге.

Динарски холокарст, који је познат по подземном богатству квалитетних хладних карстних изданских вода, може се схватити и као један велики отворени нискотемпературни хидрогеотермални конвективни систем (Milivojević, 1989). На то указују појаве нискотемпературних термоминералних вода карактеристичног хемијског састава и температуре 18–25 °C дуж јадранске обале, хладна карстна врела и резултати температурних мерења у дубоким нафтним бушотинама у његовим појединим деловима. Његови главни елементи су приказани на сл. 3.

Конвекција у овим системима је принудна тако да се карактерише високим вредностима хидрауличких градијената и притисака, који су проузроковани, углавном, због изразите топографске висине рељефа у подручју прихрањивања резервоара хладном водом. У појединим деловима резервоара су различите вредности температуре, геотермалног градијента, густине топлотног тока и праваца кретања воде (сл. 3).

Топлотни ток, који доспева у дубоко карстификовани мезозојски карбонатни комплекс Спољашњих Динарида, потиче из његове подлоге од водонепропустних палеозојских стена. Обзиром на дебљину земљине коре претпоставља се да је ујед-



начених и константних вредности, односно да представља чисту кондуктивну компоненту ( $q_c$ ) која потиче из коре и горњег омотача.

Вредности примарних или базалних вредности густине топлотног тока у подручју Спољашњих Динарида и Јадранског басена могу се сагледати на основу геотермалног модела земљине коре у овим подручјима (Миливојевић, 1992, 1993). Овај модел, поред осталих, укључује геолошки модел и модел производње радиогене, тј. геотермалне топлоте у земљиној кори и горњем омотачу на подручју претходне СФРЈ. Према том моделу на подручју Спољашњих Динарида дебљина "сидиментног слоја" је 5–13 km (Dragašević et al., 1990), "гранитног слоја" од 9–15 km а "базалтног слоја" од 16–25 km. За ове и топлотно–физичке геотермалне параметре из табеле 1. добија се да минимална вредност густине терестричног или геотермалног топлотног тока, који се ствара у земљиној кори на подручју Спољашњих Динарида, тј. примарна или чиста кондуктивна компонента ( $q_c$ ) износи 40–50 mW/m<sup>2</sup>.

Табела 1. Основни параметри геотермалног модела земљине коре на подручју Спољашњих Динарида (Миливојевић, 1992, 1993)

Table 1. Basic parameters of the Earth's crust geothermal model for the Outer Dinarides (Milivojević, 1992, 1993)

Рачунски и физички "слој" Calculated and physical layers	Топлотна проводљивост Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> K)	Производња радиогене топлоте Radiogenic heat generation (10 <sup>-6</sup> W/m <sup>3</sup> )
"Сидиментни слој" "Sediment layer"	1,2 – 2,6	0,3 – 1,0
"Гранитни слој" "Granite layer"	2,7	2,4
"Базалтни слој" "Basalt layer"	2,1	0,1 – 0,5

## ПОРЕКЛО ГЕОТЕРМАЛНЕ АНОМАЛИЈЕ

Холокарст Спољашњих Динарида је веома специфичан хидрогеолошки феномен, познат, пре свега, по безводности површи терена и по богатству подземном водом. Његове хидрогеолошке карактеристике су дуго и детаљно истраживане скоро на целом његовом пространству, а нарочито у приобалном делу због водо-снабдевања пијаћом водом.

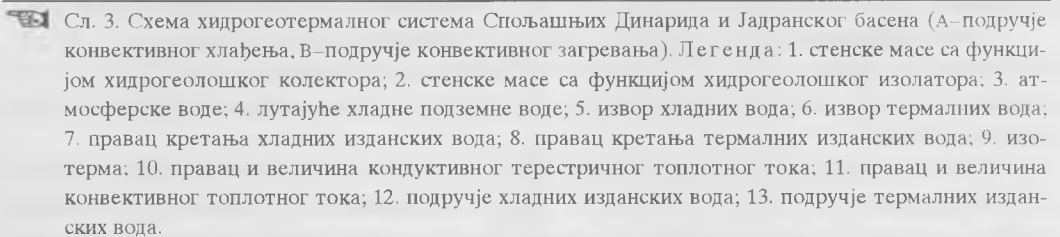
 Сл. 3. Схема хидрогеотермалног система Спољашњих Динарида и Јадранског басена (А– подручје конвективног хлађења, В– подручје конвективног загревања). Легенда: 1. стенске масе са функцијом хидрогеолошког колектора; 2. стенске масе са функцијом хидрогеолошког изолатора; 3. атмосферске воде; 4. лутајуће хладне подземне воде; 5. извор хладних вода; 6. извор термалних вода; 7. правац кретања хладних изданских вода; 8. правац кретања термалних изданских вода; 9. изотерма; 10. правац и величина кондуктивног терестричног топлотног тока; 11. правац и величина конвективног топлотног тока; 12. подручје хладних изданских вода; 13. подручје термалних изданских вода.

Fig. 2. Hydrogeothermal system of Outer Dinarides and Adriatic Basin (A– Convective cooling area, B– Convective heating area). Legend: 1. permeable rocks; 2. impermeable rocks; 3. atmospheric water; 4. stray ground water; 5. cold spring; 6. thermal spring; 7. direction of cold groundwater movements; 8. direction of warm groundwater movements; 9. isotherm; 10. direction and magnitude of conductive heat flow; 11. direction and magnitude of convective heat flow; 12. area of cold groundwater; 13. area of warm and hot groundwater.

Хидрогеотермалне карактеристике холокарста Спољашњих Динарида нису изучаване на начин и са детаљношћу, као што је то вршено са хидрогеолошким карактеристикама, иако је дуж приобалног дела присутно више хидрогеотермалних појава термалних вода температуре 18–23 °С. Главни узрок таквог односа према хидрогеотермалним карактеристикама динарског холокарста је што није схватано да подземне воде, због своје велике специфичне топлоте и мобилности, која је највећа баш у карстним теренима, лако и јако деформишу топлотно поље до дубине циркулације, тј. у најгорњих неколико километара земљине коре.

У холокарсту Спољашњих Динарида кретање подземних вода генерално се врши у два правца (сл. 3): 1) хоризонтално од зоне прихрањивања, која почиње од границе са Унутрашњим Динаридима, до приобалног дела и даље испод Јадранског басена, а делимично унутар њега и у супротном смеру, тј. према обали, и 2) вертикално, надоле у зони интензивне инфилтрације, и нагоре у зони истицања термалних вода у приобалном делу, тј. на просечном растојању од око 50 km од зоне прихрањивања. Због тога се конвективни пренос геотермалне топлоте врши у хоризонталном и у вертикалном правцу. Другим речима, чист кондуктивни или примарни топлотни ток ( $q_p$ ) који доспева у хидрогеотермални резервоар дели се на две конвективне компоненте, хоризонталну и вертикалну, као и на кондуктивну вертикалну компоненту (сл. 3).

Конвективни пренос топлоте у хоризонталном правцу као једнодимензионални модел описали су Jetel (1982) и Сermaк & Jetel (1985) следећом једначином:

$$\lambda b \frac{d^2 T}{dx^2} - b \rho c v_x \frac{dT}{dx} + q_i - \frac{\lambda_s}{a} (T - T_s) = 0$$

где је  $b$ – дебљина хидрогеолошког колектора кроз којег се креће вода,  $T=T(x)$ – температура у колектору на растојању  $x$  од зоне прихрањивања,  $\rho$ – густина воде,  $c$ – специфична топлота воде,  $v_x$ – Darcy–ева брзина,  $q_i$ – густина топлотног тока који из водонепропустне подлоге доспева у колектор (кондуктивни примарни топлотни ток),  $\lambda$ – топлотна проводљивост стенске масе колектора,  $\lambda_s$ – топлотна проводљивост стенске масе изнад колектора,  $a$ –дубина до колектора и  $T_s$ – температура површи терена.

Решавањем горње једначине за почетне услове  $T=T_0$  на  $x=0$  и  $T$  коначно на  $x=\infty$  добијају се релације из којих се види да циркулација воде у колектору проузрокује деформације температурног поља које расту са удаљавањем од подручја прихрањивања.

Због деформација температуре мења се "подповршински топлотни ток" ( $q$ ), тј. топлотни ток изнад колектора, који се разликује од примарног или базалног топлотног тока ( $q_i$ ) за износ топлоте пренете кретањем воде у хоризонталном правцу дуж колектора.

Јасно је да хидрауличке карактеристике колектора контролишу пренос топлоте. По Сermaк & Jetel (1985) ако је Darcy–ева брзина ( $v_x$ ) у колектору мања од  $1 \times 10^{-8}$  m/s тада је пренос топлоте кондуктиван, односно утицај кретања подземне воде на топлотни ток је занемарљив. За брзине реда  $10^{-6}$  m/s пренос топлоте је потпуно конвективан, тако да се "подповршинско топлотно поље" при већим брзинама од  $10^{-6}$  m/s драстично мења на растојању 50 km и више од зоне храњења, као што је случај у Спољашњим Динаридима. У вези са овим брзинама треба подразумевати брзине у сталној изданској зони колектора или хидрогеотермалног резерво-



ара, а не фиктивне брзине у карсту одређене бојењем, тј. у повременој изданској или надизданској зони.

Конвекцијом топлоте у вертикалном правцу, тј. равни бавили су се Smith & Charman (1983, 1985). Њихов модел је био дводимензионалан, дужине 40 km и дубине 5 km, са примарним кондуктивним или базалним топлотним током од  $60 \text{ mW m}^{-2}$  и са висинском разликом између подручја прихрањивања и пражњења–истицања од 1 000 m. Ови параметри су веома блиски општим параметрима геотермалног модела Спољашњих Динарида (сл. 3). Главни резултати њихових моделских прорачуна су следећи:

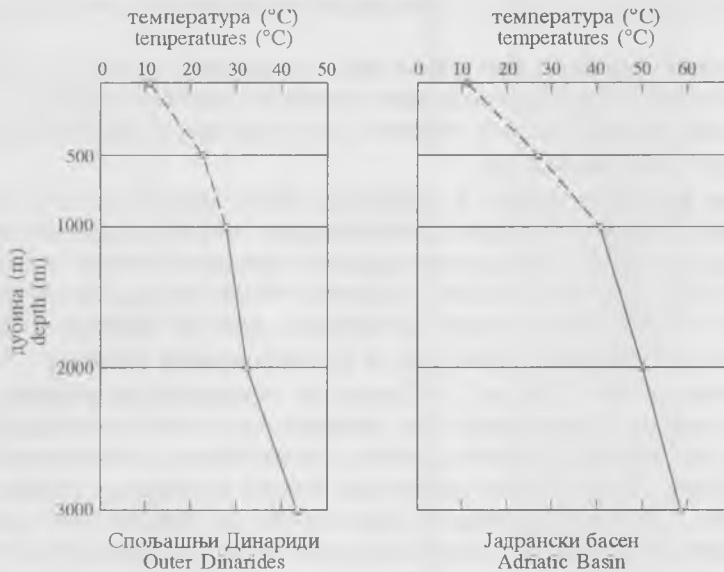
- са повећањем дубине до водонепропустне подлоге резервоара или колектора повећавају се ефекти конвекције;
- ефекти конвекције расту са повећањем пропусности, дебљине и дубине резервоара;
- у порозним стенама и при већем броју колектора, тј. кад је повећана анизотропија пропусности ефекти конвективног преноса топлоте се смањују;
- чист кондуктивни пренос топлоте је за вредности пропусности мање од  $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  ( $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2 = 1 \text{ milidarcy}$ ).

Из горњих резултата Smith & Charman (1985) види се да добијени резултати сасвим одговарају хидрогеолошком и геотермалном моделу Спољашњих Динарида.

Циркулација воде кроз резервоар хидрогеотермалног система Спољашњих Динарида је највећим делом условљена разликом између надморске висине подручја инфилтрације хладних вода и подручја истицања воде из система. У хидрогеотермалном систему Спољашњих Динарида та разлика износи више од 1 500 m максимално, просечно од 800–1 000 m. С обзиром на температурну разлику између инфилтрираних хладних и термалних вода, значајну улогу има и притисак који настаје услед разлика густина вода водених стубова у подручјима са различитим геотермалним градијентима. Наиме, стално загревање доводи до ширења флуида и смањења његове густине. Загрејани флуид се диже–креће ка горњем делу резервоара, а гушћи, хладнији део флуида се спушта на другом месту у резервоару (сл. 3).

На подручју динарског карста утицај хладних вода се вршио зависно од положаја водонепропустних палеоценских и еоценских флишних баријера, све до морске обале, па и даље према мору, односно испод мора. Због тога, као и због велике дубине карстификације услед спајања палео и рецентног карста, подручје конвективног хлађења у холокарсту Спољашњих Динарида је веома дубоко и највероватније се поклапа са дебљином карбонатног комплекса, који је, практично, карстификован до своје водонепропустне подлоге. То се види на основу вредности температура измерених у дубоким истражним нафтним бушотинама на копну у подручју где је највећа дебљина мезозојског седиментног комплекса и где је највећа дебљина земљине коре. Наиме, са статистички добијеног просечног температурног дијаграма из бушотина на подручју Спољашњих Динарида (сл. 4) види се да је он конкаван што је доказ дубоке и брзе инфилтрације хладних метеорских вода, брзе циркулације хладних подземних вода, односно конвективног хлађења терена. То се види и на основу резултата мерења температуре у дубоким бушотинама у холокарсту Црне Горе (Миливојевић и Бурић, 1987), а нарочито у до сада најдубљој бушотини UK-1 у овом подручју код Улциња, чија је локација на копну у непосредној близини морске обале, и у којој су вредности просечног геотермалног градијента  $0,0094 \text{ }^\circ\text{C/m}$  или  $0,94 \text{ }^\circ\text{C/100 m}$ .

Кретање воде у колектору, односно резервоару хидрогеотермалног система, навише према површи терена јавља се у подручјима са малом надморском висином у односу на висину подручја прихрањивања. У овом случају то је приобални део Спољашњих Динарида и Јадранског басена где преко резервоара леже водонепропустне наслаге терцијарне и квартарне старости. У њему су хидраулички градијенти ниски а топлотни ток повишен или висок. Другим речима, вода која се инфилтрира доводи до смањења температурног градијента, а вода која се на другој страни резервоара креће нагоре, односно мигрира навише доводи до повећања температурног градијента. Утицај хлађења у карстним теренима је веома дубок и врши се до најдубље тачке до које се врши циркулација изданских вода. Хладна вода се споро загрева тако да је њено кретање праћено продуженим утицајем хлађења (сл. 3).



Сл. 4. Статистички средњи геотермограми добијени из резултата температурних мерења у 20 дубоких бушотина на подручју Спољашњих Динарида и 22 бушотине на подручју Јадранског басена (Ravnik et al., 1992).

Fig. 4. Statistical average geothermogram based on temperature logs from 20 boreholes of Outer Dinarides and 22 boreholes of Adriatic Basin (Ravnik et al., 1992).

У прилог хидрогеолошким узроцима описане аномалије иде и чињеница да густина геотермалног топлотног тока расте од приобалног дела према средишњем делу мора упоредо са порастом дебљине терцијарних и квартарних седимената испод њега, док се дебљина земљине коре смањује у истом правцу. У таквим деловима Јадранског басена, као што је подручје јужног Јадрана (сл. 1), дебљина, претежно глиновитих седимената терцијарне и квартарне старости је до 10 km. Високе вредности густине топлотног тока у том подручју једним делом су последица "blanketing effect"—а тих седимената који су добри водо и термо изолатори. У средњем и северном Јадрану тај ефекат одсуствује или је веома мали, јер је дебљина морских седимената мала, или су они песковитог састава, тако да се продужени утицај кретања подземних хладних карстних вода (сл. 3) осећа на великом растојању од обале (сл. 2). Њега појачава и дејство велике масе хладне морске воде, која се ин-

филтрира у иалеорељеф морског дна од карстификованих карбонатних мезозојских стена.

### ЗАКЉУЧАК

На подручју Спољашњих Динарида присутна је пространа геотермална аномалија, која се одликује веома ниским вредностима геотермалних градијената и густине топлотног тока. Пространство аномалије се поклапа са пространством холокарста у веома дебелим карбонатним наслагама мезозојске старости. Обзиром да се њихова карстификација вршила са малим прекидима, почев од средњег тријаса, то је хлађење целог карбонатног комплекса било интензивно и веома дубоко (6–8 km), све до водонепропустне подлоге. Према томе, узрок хлађења, тј. узрок аномалије је дубока и дуготрајна циркулација хладних подземних вода. Примарна или базална, чиста кондуктивна компонента густине топлотног тока у подлози карбонатног комплекса има вредност 40–50 mW/m<sup>2</sup>. У подручју аномалије она не доспева до површи терена неумањена, како је то случај у теренима од водонепропустних стена, већ се значајно смањује због циркулације хладних вода и конвекције топлоте за 20–30 mW/m<sup>2</sup>, тј. толика је вредност конвективне компоненте топлотног тока. Због тога измерене вредности густине "подповршинског топлотног тока" у коришћеним бушотинама изведеним у подручју холокарста, које иначе нису доспеле у његову водонепропустну подлогу, представљају само индикатор огромног конвективног преноса топлоте. Зато се оне не могу користити за израду геотермалних модела земљине коре на подручју Спољашњих Динарида ради прорачуна температурног поља и дебљине литосфере. Мерадавне вредности густине топлотног тока који одражава стање коре и литосфере треба на подручју Спољашњих Динарида да се мере у подлози мезозојских карбонатних наслага.

Геол. ан. Балк. полуос. Ann. Geol. Penins. Balk.	62	465-484	Београд, децембар 1998 Belgrade, Decembre 1998
---	----	---------	---

UDC 550.836.2:556.3.01:556.322.46(234.422.1) Original scientific paper

## ХИДРОГЕОЛОГИЈА – HYDROGÉOLOGIE

### THE INFLUENCE OF DEEP COLD KARST WATER FLOW IN THE OUTER DINARIDES ON TERRESTRIAL HEAT FLOW DENSITY

by

Mihailo Milivojević\*

A regional geothermal anomaly of very low heat flow densities, 15–30 mW/m<sup>2</sup>, is detected in the Outer Dinarides (Milivojević, 1992). Its extent is coincident with the karstland of about 20.000 km<sup>2</sup> surface area. The karstland is made up of Mesozoic carbonate rocks 6–8 km thick, which are heavily karstified to a depth of 5 km. Karstification evolved through the geologic time in nine stages (Milovanović, 1964/65). Deep percolation of meteoric and flow of ground water have cooled the entire karstland of the Outer Dinarides. Karstification is a Recent process in the region, from the Paleogene, and more intensive in the last two thousand years since the depletion of the vegetation cover. Consequently, the measured densities of the terrestrial heat flow to the depth of 5 km in the Mesozoic carbonate complex are inconsistent with the actual densities deep in the Earth's crust. These densities should prevail beneath the ground water flow in the carbonate rock complex, i.e. in the bedrock which is lacking effective water flow and heat convection causing the mentioned geothermal anomaly (Milivojević, 1993). Actual densities of the terrestrial heat flow in the bedrock of deposits should be 40–50 mW/m<sup>2</sup> according to tests on a geothermal model of the Outer Dinarides crust segment.

**Key words:** geothermal heat flow, geothermal anomaly, karst, convection, cold ground water, thermal water, Outer Dinarides.

### INTRODUCTION

Density of the terrestrial or geothermal heat flow is one of principal parameters for interpretation and understanding of the past, present and future evolution of our planet. Most of the measurements, or determinations of the heat flow density are taken in boreholes, which are shallow, only 1–5 km, compared with the crustal or lithospheric thickness. Observations of heat flow density in very deep boreholes, in Germany and in Russia (Kola peninsula), indicate significant variations in its values at depths from a few to several times greater depths. Actually, variations in terrestrial heat flow density, measured in completed boreholes deeper than 10 km, have been established in the vertical plane.

---

\* Univeristy of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Džušina 7, 11000 Belgrade.

Boreholes commonly used to measure the terrestrial heat flow density are relatively deep (1–3 km). These and even deeper boreholes are preferred for determination of this parameter, and have been used in preparation of almost all maps and atlases of terrestrial heat flow densities. However, some of the maps have the heat flow density variations in vertical plane registered but not described and discussed, that is, new measurements and interpretation of old data are not always critically analysed.

Variations of heat flow density in vertical plane are caused by changes in climate, hydrogeology, neotectonics, structure, and other regional characters, of which hydrogeologic influence is the most important.

The influence of the hydrogeologic character of a region, or of individual lithologic member or lithostratigraphic unit on the geothermal temperature field increases with the depth, velocity and period of unconfined ground water flow. In the process, ground water, formed of cold atmospheric and surface waters, cools the ground and at the same time gradually warms up, and then more or less heated, emerges elsewhere on earth surface. Thus, ground water transfers enormous amounts of geothermal heat from one segment of the crust to another, both in plan and in depth. The mechanism of transfer is convection and the resulting effect is anomalies in the heat flow density.

Anomalies in heat flow density, mainly caused by regional hydrogeology, are commonest in karstland. One of anomalies is detected in the Outer Dinarides, in the Dinaric holokarst. It is a regional anomaly, which extends from Istria, through Lika, Dalmatia, Herzegovina, and southern Montenegro to western Albania (Fig. 1), characterized by very low heat flow densities, even 2–3 times lower than the average for continental Europe. The anomaly is first described by Milivojević (1992, 1993). In this work, its likely origin will be explained.

## TEMPERATURE FIELD OF THE OUTER DINARIDES

The first map of terrestrial, or geothermal, heat flow densities for the Outer Dinarides (Fig. 1), which shows the mentioned anomaly, was prepared under the first map of heat flow densities of ex Yugoslavia by Ravnik et al. (1987). The term geothermal heat flow should be interpreted as the purely conductive component ascending from the earth interior to the upper shell of the crust, or the "sedimentary layer". The data used in mapping are temperature logs from selected deep drill holes, a total of 138 on land and 14 in the Adriatic Sea.

Fifty-five of these holes are deeper than 3 km, and thirty-seven shallower than 1 km. All holes in the Outer Dinarides are more than 1 km deep, drilled in highly karstified Mesozoic carbonate rock complex deep below the sea level, the deepest down to 5 km.

Densities of the terrestrial heat flow in the Outer Dinarides are lower than 40 mW/m<sup>2</sup>, mostly 20–30 mW/m<sup>2</sup>, and locally below 20 mW/m<sup>2</sup>. These values are believed anomalously low, because the average for continental Europe is about 60 mW/m<sup>2</sup>. Low densities of heat flow between 40 and 60 mW/m<sup>2</sup> are characteristic of stable segments of the crust, shields and platforms; from this aspect, the mentioned densities in the Outer Dinarides indicate a highly anomalous region.

The geothermal anomaly of the Outer Dinarides extends, as mentioned, from Istria, through Dalmatia, Herzegovina, southern Montenegro, northern Albania, and extreme

west of Macedonia to the northern border of Greece, covering a surface area of more than 20.000 km<sup>2</sup>. Its significance therefore exceeds its boundaries and calls for explanation of its likely cause in order to avoid wrong geothermal and other interpretations of relevant data.

### GEOTHERMAL MODEL OF THE OUTER DINARIDES AND THE ADRIATIC BASIN

Movement of ground water in the Earth's crust is an important physical process, not only in the hydrogeological, but also in the geothermal terms, because it involves the redistribution of heat. Consequently, geothermal temperature field varies and its values and those of the heat conductivity of rocks define the geothermal temperature field, or the density of heat flow. This applies to terrains built up of highly permeable rocks, particularly those of deeply karstified thick deposits of limestones and dolomites. This situation is found in interpretations of temperature logs which show characteristic shapes or sections easily recognized as effects of ground water movement. Temperature logs or parts thereof which express such a situation are not used to determine the density of heat flow. For the Outer Dinarides, where a small number of deep holes were drilled in karstland positively recognized as highly permeable, temperature logs were used in mapping the heat flow densities, because other drill holes with temperature controlling conditions were not available.

Holokarst of the Outer Dinarides has a surface area of about 20.000 km<sup>2</sup>. It has long been known for its characteristic topographic features and taken for the karst type locality. Its evolution and depth are relevant for the considered subject. The best explanation in this respect is given by Milovanović (1964/65) in "Epeirogenetic and Orogenetic Dynamics within the Outer Dinarides and Problems of Paleokarstification and Geologic Evolution of Holokarst". It is an excellent analysis and synthesis of all the available geological, hydrogeological, paleogeographic and other data for the Outer Dinarides. The importance of this work is, among others, in its presentation of a geological model which offers an acceptable explanation of the origin of the mentioned Recent geothermal, hydrogeothermal, anomaly of the Outer Dinarides.

Principal genetic characteristics of the Dinaric holokarst, according to Milovanović (1964/65) are the following:

1. Dinaric holokarst was formed through a complex and discontinuous process of karstification, and consists, as a complex geologic and geomorphologic phenomenon, of a combination of recent and stratigraphically varied paleokarsts.
2. In some areas, karstification began as early as the Middle Triassic. It was repeatedly active in many areas during the Mesozoic (karst levels), and in others has been continuous from the late Upper Cretaceous.
3. On the basis of the paleokarstification evidence, nine time-geologic phases of karstification are distinguished: (a) in Middle Triassic, (b) between Middle and Upper Triassic, (c) in Upper Triassic, (d) in Jurassic, (e) in Lower Cretaceous, (f) in Upper Cretaceous, (g) during Laramian epeirogeny and orogeny, (h) during Old Pyrenean and Pyrenean orogeny, and (i) during Savian and other phases.

An inference from the above analysis (Milovanović, 1964/65) is that almost the entire Mesozoic rock complex of the Outer Dinarides, of 6–8 km estimated thickness, was long exposed to karstification processes and consequently karstified to the impermeable bedrock.

Dinaric holokarst, known for the abundance of good cold ground water, can be interpreted as a large open low-temperature hydrogeothermal convective system (Milivojević, 1989). This is indicated by occurrences of low-temperature thermomineral water of characteristic chemical composition and temperature of 18–25°C along the Adriatic coast, cold karst springs, and temperatures measured in some intervals of deep oil wells. The main components of the system are shown in Fig. 3.

Convection is forced, characterized by high hydraulic gradients and pressures, mostly controlled by high topographic features in the area of cold water recharge. Individual parts of the reservoir vary in temperature, geothermal gradient, heat flow density, and water flow direction (Fig. 2).

The heat flow, which penetrates deep into the karstified Mesozoic carbonate complex of the Outer Dinarides, ascends from the impermeable Paleozoic bedrock. In relation to the crust thickness, the heat flow is presumably uniform and constant, a purely conductive component ( $q_1$ ) originating from the crust and outer mantle.

The primary or basal densities of heat flow in the Outer Dinarides and the Adriatic basin can be learned from a geothermal model of the given Earth's crust segment (Milivojević, 1992, 1993). The model includes a geological and a model of radiogenic, or geothermal, heat generation in the crust and the outer mantle for the territory of ex Yugoslavia. In the Outer Dinarides, according to the model, shell thicknesses are: "sedimentary layer" 5–13 km (Dragašević et al., 1990), "granitic layer" 9–15 km, and "basaltic layer" 16–25 km. For these and the physical heat parameters in Table 1, the obtained lowest terrestrial, or geothermal, heat flow density generated in the crust of the Outer Dinarides, or primary or purely conductive component ( $q_1$ ), is 40–50 mW/m<sup>2</sup>.

## ORIGIN OF GEOTHERMAL ANOMALY

Holokarst of the Outer Dinarides is a particular hydrogeologic phenomenon, known primarily for waterless surface and abundant ground water. Its hydrogeology has been long and thoroughly explored almost all over its extent, particularly by the coast, in search for drinking water.

The hydrogeothermal character of the Outer Dinaridic holokarst was not studied in the manner and detail as its hydrogeology, though a number of thermal springs of 18–23°C water temperatures emerge along the coast. The main reason for this attitude was the unawareness that ground water, owing to high specific temperature and mobility, which are the highest in karst areas, easily and strongly deform the temperature field to the circulation depth, the uppermost few kilometres of the crust.

In the holokarst of the Outer Dinarides, ground water flows into two main directions (Fig. 3): (1) horizontally, from the recharge area which extends from the Inner Dinarides to the coast and further under the Adriatic basin, and partly within it and in the opposite direction to the coast, and (2) vertically, downward in the intensive infiltration zone, and

upward in the zone of thermal water discharge along the coast, at an average distance of 50 km from the recharge zone. Hence both horizontal and vertical convective transfers of geothermal heat. Stated differently, purely conductive or primary heat flow ( $q_i$ ) reaching the hydrothermal reservoir branches into two convective components, horizontal and vertical, and a conductive vertical component (Fig. 3).

The convective horizontal heat transfer as one-dimensional model is described by Jetel (1982) and Čermak & Jetel (1985) by the equation:

$$\lambda b \frac{d^2 T}{dx^2} - b \rho c v_x \frac{dT}{dx} + q_i - \frac{\lambda_r}{a} (T - T_s) = 0$$

where  $b$  is thickness of the aquifer,  $T=T(x)$  is temperature in the aquifer at distance  $x$  from the zone of recharge,  $\rho$  is water density,  $c$  is specific heat of water,  $v_x$  is Darcy's velocity,  $q_i$  is heat flow density which reaches aquifer from impermeable bedrock (conductive primary heat flow),  $\lambda$  is heat conductivity of reservoir rocks,  $\lambda_r$  is heat conductivity of rocks overlying reservoir,  $a$  is depth of aquifer, and  $T_s$  is temperature at the surface.

Solution of the above equation, for initial conditions  $T=T_0$  at  $x=0$  and  $T$  final at  $x=\infty$ , gives relations which demonstrate that water flow in the reservoir causes temperature field deformations which grow with the distance from the recharge area.

Temperature deformations change "the subsurface heat flow" ( $q$ ), or the heat flow over the reservoir, which differs from the primary or basal heat flow ( $q_i$ ) for the amount of heat transferred by horizontal water flow along the aquifer.

Hydraulic characteristics of the water-bearing rocks control the heat transfer. According to Čermak & Jetel (1985), if Darcy's velocity ( $v_x$ ) in the aquifer is less than  $1 \times 10^{-8}$  m/s, the heat transfer is conductive, i.e. the influence of ground water movement on the heat flow is negligible. For velocities of  $10^{-6}$  m/s order, heat transfer is completely convective; at velocities higher than  $10^{-6}$  m/s, the "subsurface temperature field" drastically changes at a distance of 50 km or more from the recharge zone, as in the case of the Outer Dinarides. These velocities are those prevailing in the permanent saturation zone of the aquifer or the hydrothermal reservoir, not any fictitious velocities in karst determined by water tagging, that is in intermittent saturation zone or above it.

Vertical heat convection was studied by Smith & Chapman (1983, 1985). Their model is two-dimensional, 40 km long and 5 km deep, with the primary conductive or basal heat flow of 60 mW/m<sup>2</sup> and 1000 metres level distance between the areas of recharge and discharge. These parameters are similar with the general parameters of the Outer Dinarides geothermal model (Fig. 3). Principal results of their model calculations are the following:

- convection effects increase with the depth to the impermeable bedrock of the reservoir;
- convection effects increase with the permeability, thickness and depth of the reservoir;
- in porous rocks and in a number of reservoirs, where anisotropic permeability is increased, the effects of convective transfer are smaller;



– purely conductive heat transfer is for permeability values less than  $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  ( $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  – 1 millidarcy).

The above results of Smith & Chapman (1985) are consistent with the hydrogeological and geothermal model of the Outer Dinarides.

Circulation of water through the reservoir of the Outer Dinarides hydrogeothermal system is largely controlled by the altitudinal difference between the cold water infiltration and the discharge areas. This difference exceeds 1500 metres at the most, being between 800 and 1000 metres on average. As a result of temperature difference between the infiltrated cold and thermal waters, the pressure resulting from different densities in water columns in areas of different geothermal gradients, is an important factor. Continuous heating leads to fluid expansion and its lower density. The heated fluid ascends toward the upper part of the reservoir, and denser, colder fluid descends in another part of the reservoir (Fig. 3).

In the Dinaric karst, the influence of cold water was controlled by the position of impermeable Paleocene and Eocene flysch barriers, as far as the coast and under the sea. In consequence, and owing to the great depth of karstification resulting from combined paleo and recent karsts, the zone of convective cooling in the Outer Dinaridic karst is very deep and most likely coincident with the thickness of the carbonate rock complex which is karstified virtually down to its impermeable bedrock. An evidence of this are the temperatures measured in deep oil test wells in the area where Mesozoic sedimentary complex and the crust are the thickest. The statistical log-based average temperature diagram for the Outer Dinarides (Fig. 4) shows that the zone of convective cooling is concave, which proves deep and fast infiltration of cold meteoric water, rapid flow of cold water and thereby convective cooling. This is also indicated by temperatures measured in deep wells drilled in holokarst of Montenegro (Milivojević & Burić, 1987), particularly in the deepest well UK-1 near the sea at Ulcinj where average geothermal gradient was  $0.0094 \text{ }^\circ\text{C/m}$  or  $0.94 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ .

Ground water is ascending towards the surface in areas of low altitudes in relation to the recharge zones. In this case, it is coastal part of the Outer Dinarides and the Adriatic basin where the reservoir is overlain by impermeable Tertiary and Quaternary sedimentary rocks. Hydraulic gradients are there low and heat flow increased or high. In other words, infiltrated water reduces temperature gradient, and water ascending in the other part of the reservoir leads to the rise in temperature gradient. The cooling effect in karstland is very deep, to the deepest point of ground water circulation. Cold water is slowly heated, and its flow has a long cooling effect (Fig. 3).

An additional support to the hydrogeological causes of the described anomaly is adduced by the fact that density of the geothermal heat flow increases seaward from the coast parallel with the increasing thickness of Tertiary and Quaternary deposits under it and the decreasing thickness of the crust. South Adriatic is such a region (Fig. 1) where the thickness of dominantly Tertiary and Quaternary argillaceous rocks is almost 10 km. High heat flow densities in the south Adriatic is partly result of the blanketing effect of sedimentary rocks which are good heat and water barriers. This effect is lacking or is very low in mid- and north-Adriatic, because the thickness of marine deposits is small, or they are sandy, so that the prolonged effect of cold karst ground water flow (Fig. 3)

is felt far from the coast (Fig. 2). The effect is strengthened by the large mass of cold sea water which is infiltrating into the sea floor of karstified Mesozoic carbonate rocks.

## CONCLUSION

A large geothermal anomaly is present in the Outer Dinarides, characterized by very low geothermal gradients and heat flow densities. The extent of the anomaly is coincident with the holokarst in the thick Mesozoic carbonate rocks. As a result of continuous karstification from the Middle Triassic, with short breaks, the cooling of the entire carbonate complex has been intensive and very deep (6–8 km) down to the impermeable bedrock. Consequently, the cause of cooling, or of the anomaly, is the deep and long circulation of cold ground water. The primary or basal, purely conductive component of the heat flow density in the bedrock has a value of 40–50 mW/m<sup>2</sup>. In the region of the anomaly, it does not reach the subsurface unreduced, as it does in terrains of impermeable rocks, but is significantly reduced as a result of cold water circulation and heat convection by 20–30 mW/m<sup>2</sup>, the value of the heat flow convective component. The densities of the "subsurface heat flow", measured in holes drilled in holokarst but not reaching the impermeable bedrock, are therefore only an indication of the enormous convection heat transfer. This is the reason why these values cannot be used in geothermal models of Earth's crust in the Outer Dinarides for calculation of the temperature field and the lithospheric thickness. Effective heat flow density which expresses the state of the crust and the lithosphere in the region of the Outer Dinarides should be measured in the bedrock of Mesozoic carbonate rocks.

*Translated by D. Mijović-Pilić*

## ЛИТЕРАТУРА – REFERENCES

- Dragašević T., Andrić P. & Joksović P., 1990: Structural Map of Mohorovičić Discontinuity of Yugoslavia – Scale 1:500 000. Fed. Geol. Inst., Beograd.
- Grubic A., 1980: An Outline of geology of Yugoslavia.– 26th Internat. Geological Congress Paris. Guide book, 49.
- Čermak V. & Jetel J., 1985: Heat flow and ground water movement in the Bohemian Cretaceous Basin (Czechoslovakia).– *Journal of Geodynamics*, 4, 285–303.
- Jetel J., 1982: Hydrogeologicke vlastnosti hornin v geotermalne perspektivnich oblastech Českeho masivu v hloubkach 1–6 km. In: T. Pačes (Ed.), *Hydrogeologicke aspekty využití zemského tepla suchých hornin v perspektivnich oblastech ČSR* (in Czech).– *Ustr. ustav geol.*, 8–21, Praha.
- Milivojević M., 1987: Prva preliminarna karta terestričnog toplotnog toka područja Srbije, Cme Gore i Makedonije. U: *Problematika istraživanja resursa geotermalne energije sa posebnim osvrtom na mesto i ulogu geofizičkih metoda istraživanja*.– Komitet za geofiziku SITRGMJ, 221–230, Beograd.
- Milivojević M., 1989: Ocena geotermalnih resursa teritorije SR Srbije van teritorija SAP.– *Doktorska disertacija*, Rud.–geol. fak., Univ. u Beogradu, 459 kuc. str., Beograd (nepublikovano/unpublished).
- Миливојевић М. (=Milivojević), 1992: Геотермални модел земљине коре и литосфере на територији Југославије.– *Геол. ан. Балк. полуос.*, 56/2, 345–364, Београд.
- Milivojević M., 1993: Geothermal Model of Earth's Crust and Lithosphere for the Territory of Yugoslavia: Some Tectonic Implications.– *Studia geoph. et geod.*, 37, 265–278, Praha.

- Миливојевић М. и Бурић М. (=Milivojević & Buric), 1987: Прелиминарна оцена општих геотермалних карактеристика и хидрогеотермалне потенцијалности Црне Горе. Геолошки гласник. XII. Завод за геол. истр. СР Црне Горе, 105-116, Титоград.
- Milovanovic B., 1964/65: Epirogenetska i orogenska dinamika u prostoru Spoljašnjih Dinarida i problemi paleokarstifikacije i geoloske evolucije holokarsta.- Vesnik, IV/V, B, Zavod za geol. i geof. istr., 5-44, Beograd.
- Ravnik D., Milivojevic M., Kolbah S., Jelic K., Miošić N. & Tonic S., 1987: Geothermal Atlas of Europe-Yugoslavia (Geothermal Regime in Yugoslavia).- Unpublished Report, SGZ, 1-22, Beograd.
- Ravnik D., Kolbah S., Jelic K., Milivojevic M., Miošić N., Tonic S. & Rajver D., 1992: Yugoslavia. In: E. Hurtig, V. Čermak, R. Haenel and V. Zui (Eds), Geothermal Atlas of Europe - Geoforschungszentrum Potsdam Publ., 1: 102-104, 152-153.
- Smith L. & Chapman D. S., 1983: On the thermal effects of groundwater flow. 1. Regional scale systems.- Journal Geophysical Research, 88, B1, 593-608.
- Smith L. & Chapman D. S., 1985: The influence of water table configuration on the near-surface thermal regime.- Journal of Geodinamics, 4, 1-4, 183-198.