

Geol. vjesnik	Vol. 42	str. 163—186	Zagreb 1989.
---------------	---------	--------------	--------------

UDK 551.24:536.2

Izvorni znanstveni članak

Problemi geotermalne geologije Dinarida u odnosu na tektogenezu

Milan SUŠNJAR

Institut za geološka istraživanja, Sachsova 2, p.p. 283, YU — 41000 Zagreb

U ovom radu dan je kritički osvrt na pristup geotermalnoj problematici, na poglede o prirodi geotermalnog transfera na nekim lokalitetima pozitivnih geotermalnih anomalija u Dinaridima. Analizirani su rezultati izvedenih geotermalnih bušenja i ukazano na probleme koji proističu iz tih istraživanja. Prezentira se odnos između krupnih intrakrustalnih strukturnih planova i velikih geotermalnih anomalija, te manifestacija geotermalnog aktiviteta izraženog orudnjavanjem u jugoistočnoj Evropi. Iz tih korelacija stvorena je nova slika o distribuciji geotermalnih tokova unutar krustalnih strukturnih sistema.

In the paper is given a critical review on the approach to geothermal problems and the aspects of the nature of geothermal transfer in some localities of geothermal anomalies in the Dinarides. The results of some geothermal drilling were analyzed and pointed out to some problems derived from this drilling. It is presented the relation between large intracrustal structural units and large geothermal anomalies, and the manifestation of geothermal activity expressed in mineralization processes in the southeastern Europe. Based on this correlation a new idea on the distribution of geothermal flows within crustal structural system was accomplished.

UVOD

Energetska kriza kroz posljednja dva decenija provocirala je pojačan interes geoznanosti za geotermalne energetske resurse. To je rezultiralo uključivanjem stručnjaka različitih profila — geofizičara, hidrogeologa, naftnih i regionalnih geologa u rješavanje problematike iznalaženja i eksploatacije geotermalnih energetske resursa u našoj zemlji. U toj situaciji stvoreni su različiti pristupi i gledanja kako na osnovne probleme i objekte istraživanja tako i na metodologije. U dosad objavljenim radovima izloženo je niz pogleda od geneze pojedinih pojava pa do procjena geotermalnog energetskeg potencijala širih oblasti. Interes skladnijeg razvoja geotermalne geologije zahtijeva širi kritički osvrt na pristupe geotermalnoj problematici i metodološkim mogućnostima rješavanja te problematike.

Kritički osvrt

Po pristupima geotermalnoj problematici, koji provejavaju iz dosad objavljenih radova, po prisutnim problemima i načinu zaključivanja o prirodi i distribuciji geotermalnih tokova lako se zapaža da ni osnovni

problemi često nisu uočeni niti locirani u odgovarajuće područje geoznanosti gdje se mogu rješavati. Opći je dojam da su više prisutne tendencije pojednostavljivanja geotermalne problematike, nego one, koje su okrenute produbljavanju, što ne ide na ruku razvoju znanosti o ovako interesantnoj i za privredu važnoj oblasti, kao što bi trebala biti geotermalna geologija.

Ove ocjene proizlaze iz postojećih rasprava o geotermalnim energetskim resursima u Dinaridima, gdje se računa sa svim teoretskim mogućnostima izvora i transfera Zemljine toplote. Zaključivanja na bazi grubih analogija s daljim prostorima, previđaju činjenicu da je ukupnost geološke evolucije Dinarida neponovljiva, a upravo procesni aspekti te evolucije su najbitniji elementi za rasvijetljavanje posljedičnih stanja koja su pred nama i predmet istraživanja.

O faktoru realnosti u procjenjivanju geneze i okolnosti kod konkretnih geotermalnih anomalija u Dinaridima, uveliko ovisi uspješnost svih poduhvata kojima je krajnji cilj eksploatacija geotermalne energije. S obzirom na geološke okolnosti, nivo istraženosti i moguću kontrolu bitnih regionalnih geoloških parametara za geotermalnu problematiku Dinarida, kritičkoj analizi potrebno je podvrgnuti tretman tri važna elementa geotermalne problematike: neposredan izvor toplote, prirodu toplotnog transfera i porijeklo transportnog medija konvekcijskog toplotnog toka.

Neposredan izvor toplote kod geotermalnih anomalija

Neosporno je da dubinske toplotne emisije počivaju na energetskim stanjima magme. Na tom globalnom planu dubinskih utjecaja nema spornih problema. Kad je riječ o geotermalnim pojavama kao energetskim resursima, onda se problemi javljaju na nivou diverzifikacije dubinskih utjecaja u sedimentnom pokrovu i njihovim neposrednim uzročnicima.

Evidentni značaj magme u emisiji toplote prenosi se mehanički i nekritički i u područje diverzifikacije dubinskih utjecaja, te se samim prisustvom magmatskih tijela objašnjavaju pozitivne geotermalne anomalije ili se magmatitska tijela tretiraju kao potencijalni nosioci topline i unose u obračun geotermalne potencijalnosti. U procjenama geotermalne potencijalnosti Bosne i Hercegovine (Čičić & Miošić, 1986) računa se ne samo s tercijskim magmatizmom, već i s jurskim ultrabazičnim stijenama. Riječ je o tretiranju magmatskih tijela kao objekata vlastite energetske emisije. Na isti način se pokušavaju objašnjavati neke geotermalne anomalije u Zapadnoj Srbiji. Geotermalne pojave u području Boranje (Perlić & Milivojević, 1982), objašnjavaju se prisustvom granodioritskog intruziva. Navedeni autori drže da geotermalna energija, koja se može eksploatirati iz toplih suhih stijena granodioritskog plutona Boranje predstavlja skoro neograničeni energetski izvor.

Ova objašnjenja bazirana na nekim teoretskim pretpostavkama izgledaju vrlo atraktivna i perspektivna. I u slučaju kad nema prisutnog toplotnog transportnog medija (vode), on se može dovoditi s površine. Sasvim je izvjesno da je danas malo lokaliteta u svijetu u kojima su magmatske intruzije in statu nascendi i fazi konsolidacije magme, gdje bi teo-

retske pretpostavke o mogućnostima iskorištavanja »toplih suhих« stijena imale realniju osnovu.

U svijetu do danas nisu izvedena adekvatna i sistematska istraživanja kojim bi se utvrdile realne vremenske granice vlastite toplotne emisije intruzivnih magmatskih tijela u prirodnim okolnostima. Drugi problem se nalazi u nedostatku metode kojom bi se mogle razlikovati vlastite toplotne emisije magmatskih intruzivnih tijela, od drugih moguće prisutnih generatora toplotnog toka i druge prirode toplotnog transfera. U slučajevima kad se u geotermalnom pogledu proglašavaju potencijalnim stare u geološkim vremenskim relacijama magmatske intruzije predviđa se jedan značajan moment, a to je funkcija intruzivnih tijela u sistemu dubinske prohodnosti.

Intruzijom magme nastupa proces konsolidacije uz smanjivanje volumena koga prate frakturiranja unutar intruzivnog tijela i u kontaktnoj zoni. Ovim procesom i elementom stvorene prohodnosti spajaju se prostori različitih energetskih stanja, stvarajući osnovu za migracione procese volatila. Na toj osnovi generira se konvekcijski energetski i materijalni transfer, ostavljajući tragove u geotermalnoj izmjeni stijena i u akumulaciji mineralne materije što je jedan od značajnih faktora i metalogeneze. U tim okolnostima funkcija intruzivnog tijela u geotermalnim anomalijama ne razlikuje se od drugih nemagmatskih objekata dubinske prohodnosti, kao što su na primjer dubinski rasjedi koji sežu do astenosfere i magmatskih ognjišta.

Ukoliko se respektira izložena funkcija prohodnosti intruziva u razvoju geotermalnih anomalija, onda se geotermalne manifestacije oko intruzivnih magmatskih tijela ne mogu automatski pripisivati vlastitoj toplotnoj emisiji, a još manje biti osnova za izračunavanje geotermalnih energetskih potencijala.

Neki rezultati iz geotermalnih istraživanja u Dinaridima saglasni su sa gore izloženim mišljenjem o mogućoj funkciji magmatskih intruzija kao objekata vlastite toplotne emisije u formiranju geotermalnih anomalija. Rezultati geotermalnih bušenja u granodioritskom intruzivu Boranje u sjeverozapadnoj Srbiji (Perić & Milivojević, 1982) posebno su interesantni i instruktivni jer je to bila jedinstvena prilika da se provjeri funkcija magmatskih intruziva kao nosilaca vlastite toplotne emisije u razvoju geotermalne anomalije. Prema autorima »na dubini od 120 m dobijena je termalna voda s temperaturom od 28,4 °C u količini od 12,5 l/s. Isticanje vode se vrši pod pritiskom 343,2 KPa. Ovo su bile maksimalne vrijednosti izdašnosti, temperature i pritiska u bušotini, jer daljim bušenjem u intervalu 120—200 m dubine nije dobijeno povećanje ovih parametara«. Ovdje je riječ o bušotini B-1. Susjednom bušotinom B-2, na dubini većoj za 35 m, izmjerena temperatura vode iznosila je samo 21,6 °C.

Izloženi rezultati istraživanja ukazuju na dva važna momenta: (1) da se s vlastitom toplotnom emisijom ne može računati ni kod intruzije post kredne starosti, (2) da prisutne geotermalne manifestacije počivaju na drugoj prirodi geotermalnog transfera od onog, koji bi pripadao vlastitoj emisiji intruziva i bio konduktivan, jer bi u tom slučaju imali porast temperaturnih vrijednosti s dubinom.

Detaljna strukturna razrada u prelaznom pojasu između Unutrašnjih i Vanjskih Dinarida u svrhu rješavanja geotermalne problematike (Šušnjara, 1983, Šušnjara & Grimani, 1986) ukazala je na tektonogenetске procese u kojima dominiraju horizontalna kretanja i navlačenja regionalnih razmjera. Utvrđeni strukturni sistemi nastavljaju se kroz sjeverozapadnu Bosnu prema istoku. U tom svjetlu postavlja se nekoliko pitanja: — da li su intruzivna tijela na primarnom mjestu? — da li još mogu predstavljati primarne elemente dubinske prohodnosti o kojima je bilo riječi ili primaju konvekcijske toplotne tokove posredno iz rasjednog sistema u sedimentnom pokrovu?

Priroda toplotnog transfera kod geotermalnih anomalija

Diverzifikaciju dubinskih utjecaja na kojoj počivaju i geotermalne anomalije valja razmatrati i kroz uopćenu funkciju sedimentnog pokrova sa stanovišta prohodnosti. Donji dio sedimentnog pokrova, koga izgrađuju uglavnom klastiti paleozoika u čijem su sastavu u znatnoj mjeri zastupljeni i sedimenti glina, u primarnim okolnostima predstavlja medij negativnih svojstava za prohodnost kondukcijskog i konvekcijskog toplotnog transfera. To je prirodni zaštitni omotač za intenzivnije gubljenje unutarnje toplote Zemlje.

U tim okolnostima dominira konvekcijski toplotni transfer koji se odvija ispod sedimentnog pokrova i usmjerava prema rasporedu energetskih stanja u vršnim dijelovima fundamenta. Koncentracijom konvekcijskih toplotnih tokova na prostore nižih energetskih stanja odvijala bi se prva diverzifikacija dubinskih utjecaja i bez učešća tektonike.

Tektonogenetski procesi, koji se često sinhronično odvijaju u fundamentu i u sedimentnom pokrovu, kao što je to slučaj u jugoistočnoj Evropi tokom geološke evolucije kroz neogen, dominirajući su faktori dubinskih otvaranja i razvoja geotermalnih anomalija. Horizontalna kretanja s premještanjem stijenskih kompleksa, dekolmanska otvaranja fundamenta s pratećim rasjedanjima bitno su mijenjala stanja u sedimentnom pokrovu u odnosu na prethodne uvjete prohodnosti za kondukcijske i konvekcijske geotermalne tokove.

O stupnju tektonizacije neke oblasti uveliko će ovisiti koji će od mogućih geotermalnih transfera biti dominirajuće prisutan u razvoju geotermalnih anomalija. Upravo radi toga kao bitan preduvjet rješavanja geotermalne problematike nameće se dobro poznavanje regionalnih tektonogenetskih procesa i detaljnija kontrola strukturnih sistema u prostoru, što za najveći dio Dinarida još nije ostvareno.

Čičić & Miošić, (1986), izlažući situaciju s temperaturama u bušotinama, zaključuju »To je razlog što u skoro svim bušotinama termalnih i termomineralnih voda nemamo povećanje temperature sa dubinom, što proizlazi iz saznanja da se tople vode kreću iregularnim pukotinama«. Ako se vode kreću »iregularnim pukotinama« onda se radi o konvekcijskom transferu koji uzrokuje anomaliju i u toj situaciji ne mogu osjetno rasti temperature s dubinom jer se očito ne radi o konduktivnom transferu koji je vjerojatno očekivan.

Geotermalnim istraživanjima kod Kaknja (Slišković, 1986), bušenjem na dva lokaliteta maksimalne temperature su zabilježene u prvih 90 m, a napredovanjem kroz daljih 200 m slijedio je sukcesivni pad temperatura. I u ovom slučaju geotermalne anomalije su objašnjavanje konduktivnim toplotnim transferom, iako činjenice ukazuju na nešto drugo. Ovi isti problemi su prisutni i u inozemnoj literaturi, a proizlaze iz procjena s prenaplašenom funkcijom konduktivnog toplotnog transfera u pojavama geotermalnih anomalija.

Temperaturne inverzije su zabilježene i na dubokoj istražnoj bušotini poluotoka Kole (SSSR). U intervalu 4,3—5 km izmjeren je porast geotermijskog gradijenta na 1,9—2°C/100 m, a zatim pad u intervalu 6,8—7 km na 1,5°C/100 m (Vernik et al. 1984). Zona porasta geotermijskog gradijenta nalazi se u zoni tektonizacije s prisutnim visokomineraliziranim vodama (Borevskij et al. 1984), pa se lako uočava da su utvrđene geotermalne anomalije uzrokovane konvekcijskim toplotnim tokom koga kontroliše prohodnost strukturnog sistema.

Porijeklo transportnog medija konvekcijskog toplotnog toka

O porijeklu fluida kao konvekcijskog medija transfera toplote i neposrednog uzročnika najvećeg broja geotermalnih anomalija u Dinaridima susrećemo različita mišljenja i tumačenja. Najčešće se genezi fluida pristupa s čisto hidrogeološkog stanovišta, koje proizlazi iz klasičnog bavljenja problemima površinskih i potpovršinskih voda. Porijeklo fluida se tumači infiltracijom atmosferilija, što je neprimjereno širini problematike i okolnostima pod kojima se generiraju fluidi konvekcijskog toplotnog transfera. Na ovaj način, elementi koji se uključuju u posljednju fazu rasteređivanja geotermalnih konvekcijskih tokova, proglašavaju se bitnim za genezu anomalije, a najbitniji momenti procesno-dinamičkih okolnosti u kojima započinje konvekcijski toplotni transfer ostaju izvan okvira razmatranja problema. To se primjećuje i u prisutnoj terminologiji kad se govori o »akumulacijama termomineralnih voda«, o »arteškim bazenima« ili o »vodozamjeni« potpuno neprimjerenim terminima kad su u pitanju geneza, priroda i energetska stanja medija konvekcijskog toplotnog transfera.

Kalkulacije s infiltracionim porijeklom fluida i vodozamjenom pred

300°C. Po toj ideji hladna voda bi se spuštala u dubinu, a topla i lakša dizala prema površini. To nije apsolutno pravilo ni kod otvorenih sistema i okolnosti hidrostatskog tlaka.

U slučaju konvekcijskog geotermalnog transfera, takav sistem cirkulacije ne egzistira u prirodi iz dva razloga. Rezultati laboratorijskih istraživanja koja su tretirala fizičko stanje vode u trendu rasta temperatura ne mogu se primjeniti na situacije u prirodi, odnosno u geološkim okolnostima. Migracioni tokovi fluida prolaze kroz različite stijenske komplekse, a visoka energetska stanja izazivaju nestabilnost ravnoteže sistema fluid-solid, što rezultira povećavanjem topljivosti i stvaranjem visokomineraliziranih pa i presaturiranih solucija veće gustoće nego što je ima voda kod 4°C.

U Crvenom moru na lokalitetima gdje su zabilježene temperaturne inverzije na dubini od 2 100 m (t 56°C), egzistira postojano stratum visokomineraliziranih otopina čija se statička stanja odražavaju i na ehosonderu (E m m e r y et al. 1969). U navedenoj situaciji se radi o otvorenom sistemu i hidrostatskim tlakovima pa ipak ne dolazi do »vodozamjene«.

Drugi razlog je što ulaženjem u geotermalnu problematiku izlazimo iz oblasti klasične hidrogeologije u kojoj se operira s hidrostatskim tlakovima. Geološke okolnosti kroz koje prolazi osnovni nosioc toplotnog konvekcijskog toka karakteriziraju viši tlakovi od hidrostatskog. Dubinski migracioni toplotni tok započinje u okolnostima geostatičkog tlaka. Samim kretanjem nastupa rasterećenje s trendom približavanja hidrostatskom tlaku. Međutim, u svim tim fazama energetskog rasterećivanja nema ni teoretskih mogućnosti da fluidi nižeg energetskog sistema pređu u viši energetski sistem. Tek u zoni izjednačavanja tlakova nastaje miješanje površinskih i dubinskih fluida. U toj fazi i okolnostima započinje značajnija degradacija toplotnog transfera, ali ne i geneza geotermalnih anomalija.

Pored ovih izloženih načelnih opaski na savremeni tretman nekih problema geotermalne geologije ne samo u nas već i u svijetu, poseban komentar zavređuje konkretan pristup geotermalnoj problematici Dinariada. Ovdje treba, u prvom redu, istaći procjenu nivoa spoznaje regionalnih geoloških faktora bitnih za rješavanje geotermalne problematike, koji s brojnim otvorenim regionalnim problemima čine limitirajući moment za bilo kakvu realniju procjenu geotermalnih energetskih potencijala Dinariada.

Dalje, u fazi kad dominiraju puka nagađanja o bitnim elementima predmetne problematike, oblast geotermalnih anomalija prezentira se bez osnove simplificirano. No, još važnijom implikacijom čini se, što se na taj način reduciraju ili stavljaju u drugi plan istraživanja koja svojom metodologijom mogu efikasnije rješavati postojeće probleme.

Na kraju treba istaknuti probleme kod ocjenjivanja geotermalnih potencijala kao energetskih resursa. I pored toga što se geotermalna energija tretira od naftnih geologa i hidrogeologa kao obnovljivi energetski resursi, u procjenjivanju potencijalnosti pristupa se kao naftnim ležištima, te se i govori o akumulacijama toplote čime fenomen geotermalne anomalije dobiva statičko obilježje. Iz tog izmijenjenog tretmana, kad su u pitanju proračuni potencijalnosti a govori se i o proračunu rezervi koriste se zapreminske metode za izračunavanje tople fluidne mase što

je neprimjereno dinamičkim stanjima i prirodi dominirajućeg konvekcijskog toplotnog transfera. Radi se o kontinuiranom dotoku i protoku energenta čiji intenziteti se teško kontroliraju. Zbog regionalnih geoloških okolnosti, posebice navlačne strukturne građe Unutrašnjih Dinarida i procesne evolucije energetskog rasterećivanja termomineralnih voda po elementima prohodnosti, znatan dio konvekcijske geotermalne aktivnosti ostaje prikriven. Dio tih migracionih tokova usmjeren prema Vanjskim Dinaridima dopijeva do duboko karstificiranih zona gdje im se gubi svaki trag.

Izloženi kritički prikaz nema namjeru osporavati geotermalnu potencijalnost Dinarida, koja je nedvosmisleno prisutna i manifestirana brojnim termomineralnim vrelima i drugim pojavama dubinskog porijekla, već mu je namjera da istakne probleme s kojima se već sada susrećemo i ukaže na one s kojima ćemo se u budućnosti susretati radi neadekvatnog pristupa geotermalnoj problematici.

Tektogenetski procesi i dubinska otvaranja

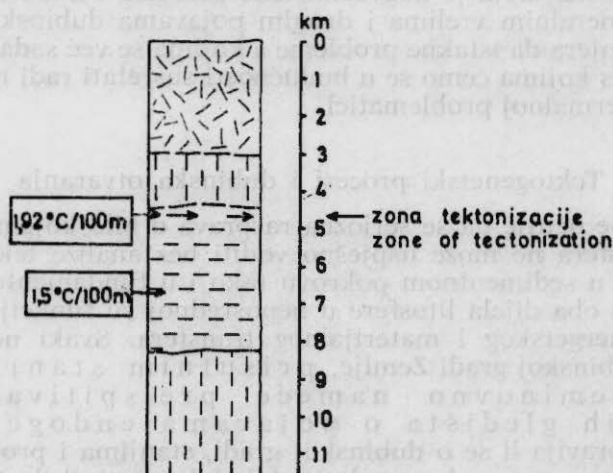
Danas je sve očitije da se seriozna rasprava o bilo kojem aspektu dubinskog transfera ne može uspješno voditi bez analize tektongenetskih procesa kako u sedimentnom pokrovu tako i u fundamentu. Strukturni planovi u ova oba dijela litosfere u neposrednoj su funkciji distribucije dubinskog energetskog i materijalnog transfera. Svaki nov prodor u spoznaji o dubinskoj građi Zemlje, prisutnim stanjima i procesima neminovno nameće preispitivanje svih prethodnih gledišta o pojavama endogenog porijekla. Raspravlja li se o dubinskoj građi, stanjima i procesima, onda je neizbježan osvrt na neke rezultate dubokih istražnih bušenja na Koli (SSSR), gdje se je najdublje doprlo u kontinentalnu koru. Od tih rezultata valja istaknuti neočekivano prisustvo voda visokih energetskih stanja (Borevskiy at al., 1984) na velikim dubinama čiji se slojni pritisci približavaju geostatičkim. Pojave tih dubinskih fluida vezane su za subhorizontalne zone tektonizacije i nosioci su konvekcijskih toplotnih tokova koji presjeca profil bušotine. Zbog toga nakon zone tektonizacije slijedi pad geotermičkog gradijenta.

Posebnu pažnju privlači razvoj pukotinskih sistema na profilu bušotine kao značajan element prohodnosti (Sl. 1). Do 3 km pukotine su različitih smjerova. Od 3—4,3 km prevladavaju vertikalne, nadalje dominiraju horizontalne do 8,2 km. Od 8,2 km do kraja bušotine ponovo dominacija vertikalnog pukotinskog sistema. Ovakva izmjena pukotinskih sistema na profilu bušotine govori o diferenciranom naprezanju i dinamičkim stanjima u fazi intrakrustalnog strukturiranja. Dominirajući horizontalni pukotinski sistem pripadao bi zoni diferenciranih naprezanja i kretanja u procesu strukturiranja. U tim uvjetima dolazi do subhorizontalne tektonizacije i stvaranja zona dubinske prohodnosti, na što upućuje prisustvo visokomineraliziranih voda i pojačani konvekcijski toplotni tok u tim zonama.

Ispitivana fizičko-mehanička svojstva stijena fundamenta na dubokoj bušotini Kole (Vernik at al. 1984) su pokazala da se lomljivost stijena od 6,8 km dubinom povećava nekoliko puta, riječ je o arhajskom stijenu.

skom kompleksu. Ova nova saznanja su važan moment za uočavanje mogućih okolnosti i posljedica kod dubinskih geodinamskih napreznja.

Iz izloženih novih spoznaja ovdje treba istaći dva važna momenta. Stanja i prisutan dubinski transfer o kojima je bilo riječi situirana su u starijim metamorfnim kompleksima Baltičkog štita, koji je izvan aktivnih orogenih pojaseva. Unatoč te činjenice dubinska komunikativnost u strukturnom sistemu još je i danas otvorena. S razlogom postoji uvjerenje, da je duboka istražna bušotina bila locirana iznad pozitivne strukture Moho diskontinuiteta jugoistočnije, različiti vidovi dubinskog transfera bili bi još intenzivniji.



Sl. 1. Pukotinski sistemi na profilu bušotine Kola s konvekcijskim toplotnim tokom u zoni tektonizacije (prema podacima: Vernik et al., 1984, Galdin et al., 1984).

Fig. 1. Joint systems on the profile of the Kola borehole with convectional heat flow in the zone of tectonization (based on data: Vernik et al., 1984, Galdin et al., 1984).

Za utvrđena stanja u dubokom fundamentu ima više razloga. Dubinski fluidi pripadaju geostatičkom režimu, što uz stalan dotok osigurava razvoj sistema prohodnosti hidrofrakturiranjem. Dok god postoji ekstrakcija volatila iz gornjeg mantla, dubinski strukturni sistem koji distribuira konvekcijske tokove u kori biti će otvoren. Drugi razlog se nalazi u velikoj kemijskoj agresivnosti fluida visokih energetske stanja čime se i na taj način osigurava dubinska prohodnost. Treći razlog se nalazi u upravo utvrđenoj povećanoj lomljivosti stijena na većim dubinama, čime se olakšavaju procesi hidrofrakturiranja i dubinskog otvaranja. Sve nabrojene okolnosti nalaze se iznad prostora koga karakteriziraju trajni procesi, kretanja i generiranja energetskog i materijalnog dubinskog transfera.

Magmatske ekstrakcije fluida udružuju se na migracionim putevima s oslobođenim fluidima iz procesa metamorfizma. Po nekim autorima (B o-

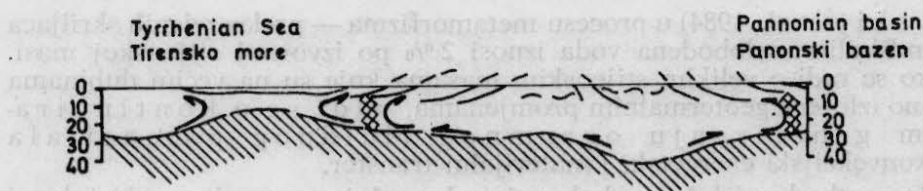
revskij et al., 1984) u procesu metamorfizma — prelaz zelenih škriljaca u amfibolite, oslobođena voda iznosi 2% po izvornoj stijenskoj masi. Kako se radi o velikim stijenskim masama koje su na većim dubinama trajno izložene geotermalnim promjenama, radi se o kontinuiranom generiranju ogromnog fluidnog potencijala za konvekcijski energetski i materijalni transfer.

Na prethodno izložene okolnosti nadograđuju se geodinamski faktori u oblastima geotektonske aktivnosti, što rezultira evidentnim intenziviranjem geotermalnog aktiviteta. Vertikalna kretanja pri formiranju pozitivnog ocrta Mohorovičićeva diskontinuiteta, kao i horizontalna kretanja ploče nose predispozicije za intrakrustalnu tektonizaciju u zonama skokovitih promjena fizičko-mehaničkih svojstava stijenskih kompleksa. U tim tektogenetskim procesima dubinska strukturiranja pored razvijanja sistema prohodnosti, uzrokuju diferencijaciju energetskih stanja na strukturnom planu, koja kontrolira distribuciju dubinskih konvekcijskih geotermalnih tokova. Distribucija konvekcijskih geotermalnih tokova odvija se iz prostora viših energetskih stanja u prostore nižih energija dubinskog strukturnog plana, to jest prema pozitivnim ocrtima Mohorovičićeva diskontinuiteta. Zbog toga, ne radi se o pukoj slučajnosti da je geotermalna aktivnost konvekcijskog geotermalnog transfera najintenzivnije izražena iznad pozitivnih elemenata dubinskog strukturnog plana.

Tektogenetski procesi u sedimentnom pokrovu često se odvijaju sinhronično sa strukturiranjem plohe Mohorovičićeva diskontinuiteta i praćecim dubinskim rasjedanjem, kao što je to slučaj u oblasti Tirenskog mora i njegove okoline (Sušnjar, 1983), gdje su tektogenetski procesi još i danas aktivni. Dubinska strukturiranja u oblasti Tirenskog mora pratila je dekolmanska evakuacija doneogenog sedimentnog pokrova s periklinalnom navlačnom tektonikom čija aktivnost još nije završena. Izloženi tektogenetski procesi praćeni su geotermalnom aktivnošću koja se odražava u prisutnom energetskom i materijalnom transferu konvekcijskih toplinskih tokova (Sl. 2).

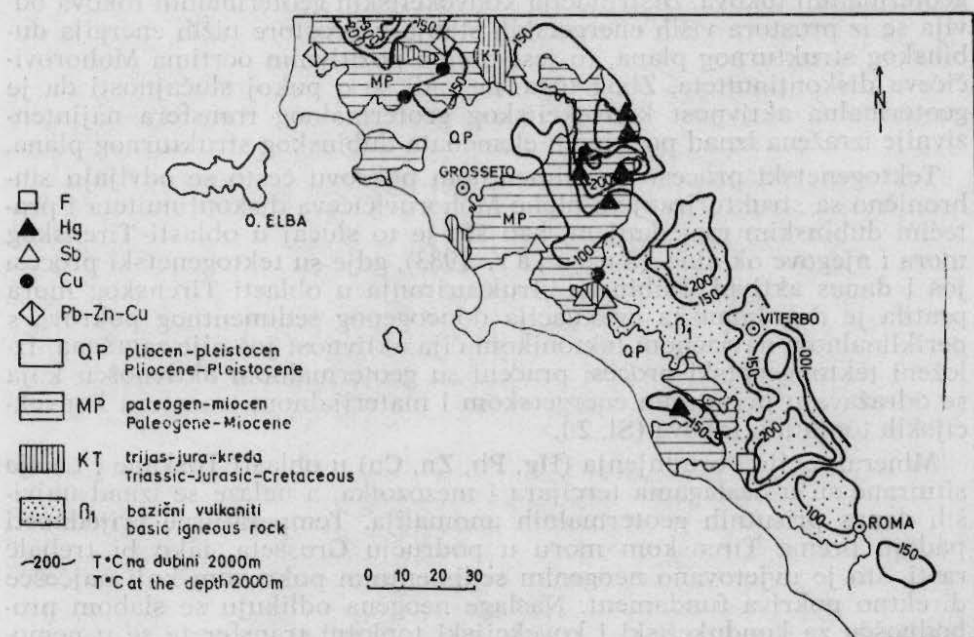
Mineralizacije i orudnjenja (Hg, Pb, Zn, Cu) u oblasti Toskane i Lacija situirane su u naslagama tercijara i mezozoika, a nalaze se iznad najviših danas prisutnih geotermalnih anomalija. Temperaturne vrijednosti padaju prema Tirenskom moru u području Grosseta, iako bi trebale rasti, što je uvjetovano neogenim sedimentnim pokrovom koji najčešće direktno pokriva fundament. Naslage neogena odlikuju se slabom prohodnošću za kondukcijski i konvekcijski toplinski transfer te se u nemogućnosti energetskog rasterećenja u Tirenskom moru vraćaju strukturnim sistemom u kontinentalnu oblast pojačane tektonizacije (Sl. 3).

Istovjetna je situacija u rubnom dijelu Panonskog bazena i u Unutrašnjim Dinaridima. Iz Panonskog bazena s neogenim sedimentnim pokrovom konvekcijski toplinski tokovi vraćaju se strukturnim sistemom u Unutrašnje Dinaride (Sl. 2). Prethodni rezultati istraživanja strukture građe Korduna i Banije (Sušnjar, 1983, Sušnjar & Grimani, 1986) su ukazali na neposrednu vezu između strukturnih sistema koji komuniciraju s dubinskom građom Panonskog bazena i geotermalnog aktiviteta u tim prostorima, a koji su manifestirani termomineralnim vrelima, mineralizacijama, orudnjavanjem i metamorfizmom. Najnoviji rezultati geotermalnih istraživanja, mogu se sažeti u zaključak — da je



Sl. 2. Shematski prikaz distribucije konvekcijskih toplotnih tokova u dubljem krustalnom dijelu i u sedimentnom pokrovu.

Fig. 2. Scheme showing the distribution of convectional heat flows in the deep crustal parts including sedimentary cover.



PREMA PODACIMA IZ: Carta mineraria d'Italia 1973

Carta delle temperature sotterranee in Italia 1982

BASED ON DATA: Carta mineraria d'Italia 1973

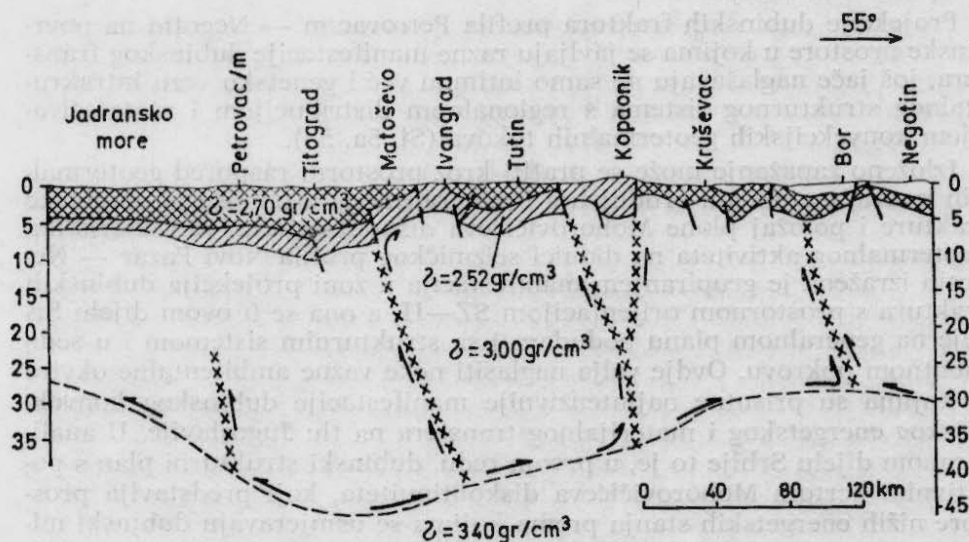
Carta delle temperature sotterranee in Italia 1982

Sl. 3. Pozicije mineralnih ležišta prema geotermalnih anomalijama u oblastima Toscana — Lacio (prema podacima: Panichi & Squarci, 1982, Stampioni, 1983).

Fig. 3. The position of mineral deposits in relation to geothermal anomalies in the Toscana — Lacio area (Based on data: Panichi & Squarci, 1982, Stampioni, 1983).

geotermalni energetski i materijalni transferi i u subregionalnim prostornim okvirima kontroliran u prvom redu faktorom strukturne prohodnosti. U zonama tektonizacije i velikog tektonskog transporta dominirajući moment je prohodnost rasjednih sistema, koju dopunjuje prohodnost litofacijesa (velikog primarnog permeabiliteta) za konvekcijske geotermalne tokove.

Analiza dubinskog strukturnog sistema u odnosu na površinske manifestacije geotermalnog konvekcijskog aktiviteta uz seizmički profil Petrovac /m — Negotin (Dragašević, 1973/74) čini se posebno interesantnom iz dva razloga. Prvo što tektongenetska evolucija ovog prostora pripada također alpskom orogenu s još uvijek aktivnim procesima strukturiranja. Drugo, što su na ovom profilu strukturni sistemi otvoreni do površine za razliku od Panonskog bazena i prostora Tirenskog mora, te se energetska rasterećenje (skraćenih) konvekcijskih geotermalnih tokova odvija neposrednije (Sl. 4).



Građa Zemljine kore duž profila Petrovac/m - Negotin (po Dragašević T. 1973/74)
Structure of the Earth's crust along the profile Petrovac - Negotin

Sl. 4. Distribucija dubinskih utjecaja u kori.

Fig. 4. The distribution of deep effects within the crust.

Sam raspored energetskih stanja po plohi Mohorovičićeva diskontinuiteta ukazuje na usmjeravajuću distribuciju migracija dubinskih fluida. Navedene okolnosti, gdje se trajnije generiraju mediji dubinskog energetskog i materijalnog prenosa, značajniji su od samog vulkanizma ili bilo kojeg akta magmatske intruzije i onog što ona objektivno može sa-

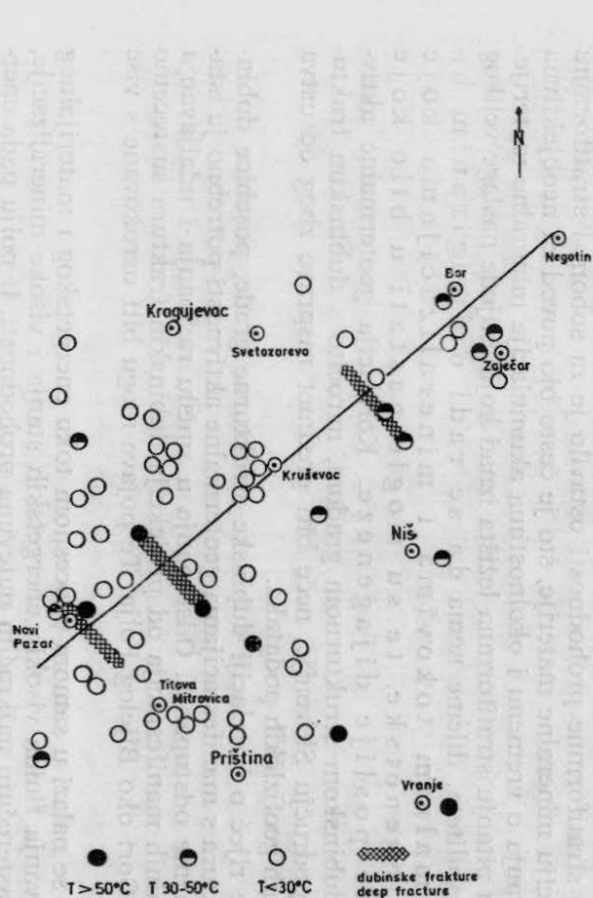
ma da donese u sedimentni pokrov. Dubinski rasjedi koji sežu do Mohorovičićeva diskontinuiteta i dublje, prihvaćaju konvekcijske migracije s ogromnih površina, neusporedivo većih nego što su to površine korijenova magmatskih aparata, koji su locirani na dubinskim rasjedima pa primaju i sami dio konvekcijskih geotermalnih tokova.

Analizom odnosa između dubinske građe na izloženom profilu i pojava prirodnih termalnih izvora viših termičkih kapaciteta (Novi Pazar 47°C, Jošanička banja 78°C) lako se uočavaju dva važna momenta: (1) da su oba izvora locirana iznad dubinskih fraktura koje komuniciraju s plohom Mohorovičićeva diskontinuiteta u njenom uzdignutijem dijelu, (2) da vertikalna dubinska fraktura ispod Kopaonika ima termalne izvore viših temperatura od položene frakture ispod Novog Pazara. Ova situacija je logična a proističe iz utjecaja dužine migracionih puteva na temperaturna stanja hidrotermalnih tokova. Izloženi momenti još su izraženiji na primjeru geotermalnog aktiviteta u području Slovenije, gdje tektonika navlačenja s još nekim faktorima utječe na dužinu migracionih puteva i temperaturna stanja.

Projekcije dubinskih fraktura profila Petrovac/m — Negotin na površinske prostore u kojima se javljaju razne manifestacije dubinskog transfera, još jače naglašavaju ne samo intimnu već i genetsku vezu intrakrustalnog strukturnog sistema s regionalnom distribucijom i rasterećivanjem konvekcijskih geotermalnih tokova (Sl. 5a, 5b).

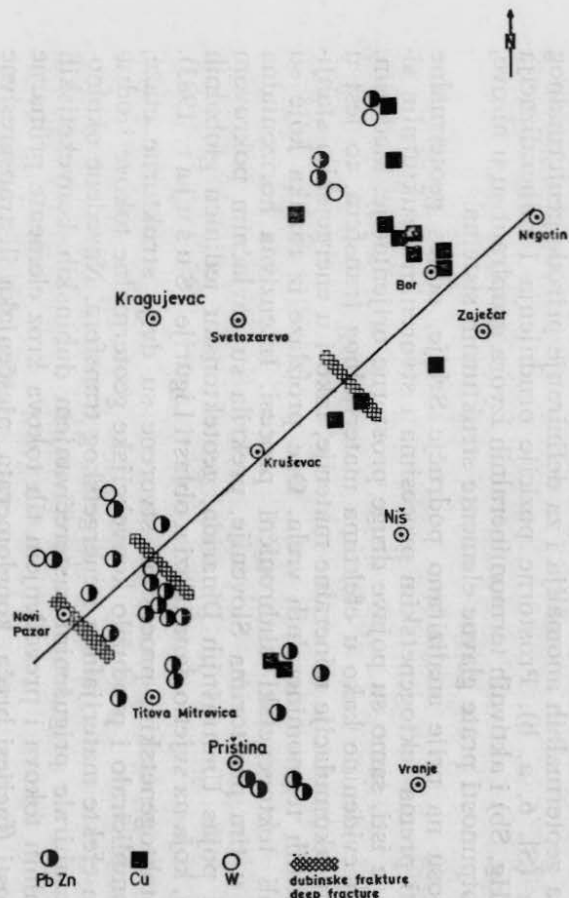
Izloženo zapažanje može se pratiti kroz prostorni raspored geotermalnih izvora, metalčnih orudnjenja i mineralizacija u odnosu na dubinske frakture i položaj plohe Mohorovičićeva diskontinuiteta. Karakteristika geotermalnog aktiviteta na dionici seizmičkog profila Novi Pazar — Negotin izražena je grupiranjem manifestacija u zoni projekcija dubinskih fraktura s prostornom orijentacijom SZ—JI, a ona se u ovom dijelu Srbije na generalnom planu podudara i sa strukturnim sistemom i u sedimentnom pokrovu. Ovdje valja naglasiti neke važne ambijentalne okvire u kojima su prisutne najintenzivnije manifestacije dubinskog konvekcijskog energetskog i materijalnog transfera na tlu Jugoslavije. U analiziranom dijelu Srbije to je, u prvom redu, dubinski strukturni plan s pozitivnim ocrtom Mohorovičićeva diskontinuiteta, koji predstavlja prostore nižih energetskih stanja prema kojima se usmjeravaju dubinski migracioni procesi. Tektogenetski procesi alpskog orogena nisu još završeni, kao ni prateća geotermalna aktivnost. Pozitivne okolnosti za intenzivniju geotermalnu aktivnost nalaze se u aktivnim rasjednim sistemima sedimentnog pokrova, gdje dominira vertikalna i subvertikalna konvekcijska prohodnost, što osigurava najkraće puteve energetskog i materijalnog transfera. Neprikrivena aktivnost važnih rasjednih sistema osigurava da se putevi dubinske prohodnosti održavaju otvorenim.

Na izložena gledišta upućuju i geotermalne alteracije i hidrotermalna orudnjavanja tercijarnih vulkanita (Dangić, 1979/80, Milovanović, 1979/80), koji su se našli na putevima konvekcijskih geotermalnih tokova i sami zbog svoje prohodnosti postali prostori mineralne akumulacije i metalogeneze. Možda ne bi trebalo posebno naglašavati da savremena tektonska aktivnost u trusnim područjima otvara ne tako rijetko nove geotermalne izvore.



Sl. 5a. Odnos mineralizacija prema projekcijama dubinskih fraktura (Srbija).

Fig. 5a. The relation between mineralization and projected deep fractures (Serbia).



Sl. 5b. Odnos termalnih izvora prema projekcijama dubinskih fraktura (Srbija).

Fig. 5b. The relation between thermal springs and projected deep fractures (Serbia).

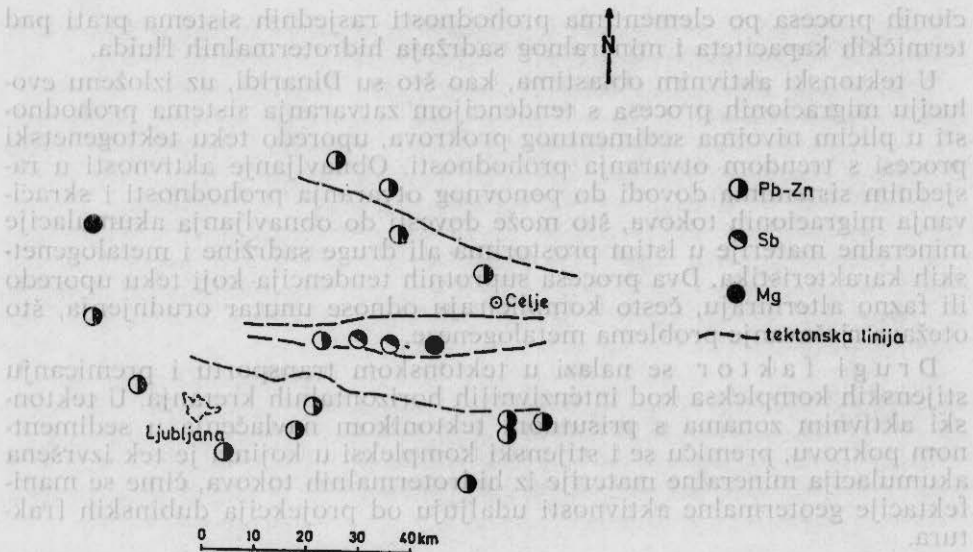
Korelacije između modernih strukturalnih sistema s jedne strane, te fosilnog i recentnog geotermalnog aktiviteta u istočnim dijelovima Slovenije više su od indikacija za ocjenu uloge tektogenetskih procesa u pojavama geotermalnih anomalija i za definiranje prirode geotermalnog transfera (Sl. 6, a, b). Prostorne pozicije orudnjenja i mineralizacija (Pb, Zn, Hg, Sb) i aktivnih termomineralnih izvora grupirani su u nizove, koji u potpunosti prate glavne elemente strukturalnih sistema.

U odnosu na prije analizirano područje Srbije, odnos geotermalne aktivnosti prema tektogenetskim procesima i stvorenim strukturalnim sistemima je isti, samo su pojave druge prostorne orijentacije. Međutim, razlike su evidentne kako u efektima materijalnog transfera, to jest u intenzitetu akumulacije mineralne materije, tako i u energetskim stanjima recentnih termomineralnih vrela. One proizlaze iz razlika koje su efektuirali tektogenetski sinhronični procesi. Intenzivna horizontalna kretanja u tim prostorima Slovenije, prekrila su navlačnim pokrovom ofiolitski pojas Unutrašnjih Dinarida, geotektonsku jedinicu globalnih razmjera, koja na svjetlo dana izlazi u oblasti Ligurije (Šušnjarić, 1983).

Ovim tektogenetskim procesima stvorene su dvije strukturalne etaže, što je kompliciralo i produžilo konvekcijske geotermalne tokove i odrazilo se na efekte materijalnog i energetskog transfera. Navedene okolnosti su rezultirale prigušenim rasterećivanjem dubinskih konvekcijskih geotermalnih tokova i prevođenjem tih tokova kroz elemente primarne prohodnosti (facijesi breča, konglomerata, pješčenjaka ili transgresivne kontakte i paleokarstifikaciju). Rasterećivanje hidrotermalnih tokova elementima stratiformne prohodnosti ostavilo je za sobom i stratiformnu akumulaciju mineralne materije, što je često bio povod za neobjektivna zaključivanja o vremenu i okolnostima akumulacije mineralne materije. Kad su u pitanju stratiformna ležišta iznad kojih slijede naslage velikog impermeabiliteta, dileme nema da se radi o dirigiranim hidrotermalnim tokovima i mineralizacijama koje nisu singenetske, te su mogle nastati u bilo koje vrijeme poslije dijageneze. Korelacija geotermalne aktivnosti s dubinskom strukturalnom građom, naročito s dubinskim frakturama u području Slovenije, neće biti predmet rasprave zbog odsustva objavljenih geofizičkih podataka.

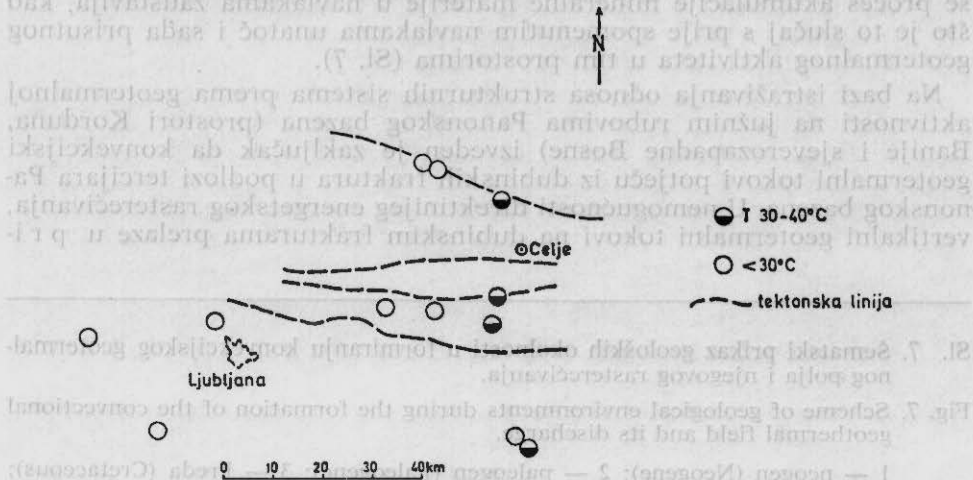
Kad je riječ o korelaciji dubinske strukturalne građe, posebice dubinskih fraktura s manifestacijama geotermalne aktivnosti potrebno je istaći i elemente odstupanja. Odstupanja u smislu rasipanja i udaljavanja geotermalnih manifestacija od projekcija dubinskih fraktura susrećemo u Crnoj Gori oko Bijelog Polja. Te pojave mogu biti uzrokovane s više faktora.

Prvi se nalazi u samom procesnom toku energetskog i materijalnog rasterećivanja fluida visokih energetskih stanja i visoke mineralizacije, koji se rasterećuju najkraćim putevima prohodnosti. U polju pada energetskih stanja hidrotermalnog toka, proces rasterećenja prati kontinuirana precipitacija koja rezultira blokadom izlaznih puteva. U toj fazi migracioni tok se produžava po elementu prohodnosti i zoni visokih energetskih okolnosti do nove pozicije energetskog rasterećivanja, čime se sve više udaljuje od glavnog dovodnog kanala. Ovu evoluciju migra-



Sl. 6a. Odnos mineralizacije prema elementima strukturnog sistema u sedimentnom pokrovu (Slovenija).

Fig. 6a. The relation between mineralization and elements of the structural system in the sedimentary cover (Slovenia).



Sl. 6b. Odnos termalnih izvora prema elementima strukturnog sistema u sedimentnom pokrovu (Slovenija).

Fig. 6b. The relation between thermal springs and elements of structural system of the sedimentary cover (Slovenia).

cionih procesa po elementima prohodnosti rasjednih sistema prati pad termičkih kapaciteta i mineralnog sadržaja hidrotermalnih fluida.

U tektonski aktivnim oblastima, kao što su Dinaridi, uz izloženu evoluciju migracionih procesa s tendencijom zatvaranja sistema prohodnosti u plićim nivoima sedimentnog prokrova, uporedo teku tektogenetski procesi s trendom otvaranja prohodnosti. Obnavljanje aktivnosti u rasjednim sistemima dovodi do ponovnog otvaranja prohodnosti i skraćivanja migracionih tokova, što može dovesti do obnavljanja akumulacije mineralne materije u istim prostorima ali druge sadržine i metalogenetskih karakteristika. Dva procesa suprotnih tendencija koji teku uporedo ili fazno alterniraju, često kompliciraju odnose unutar orudnjenja, što otežava rješavanje problema metalogeneze.

Drugi faktor se nalazi u tektonskom transportu i premicanju stijenskih kompleksa kod intenzivnijih horizontalnih kretanja. U tektonski aktivnim zonama s prisutnom tektonikom navlačenja u sedimentnom pokrovu, premiću se i stijenski kompleksi u kojima je tek izvršena akumulacija mineralne materije iz hidrotermalnih tokova, čime se manifestacije geotermalne aktivnosti udaljuju od projekcija dubinskih fraktura.

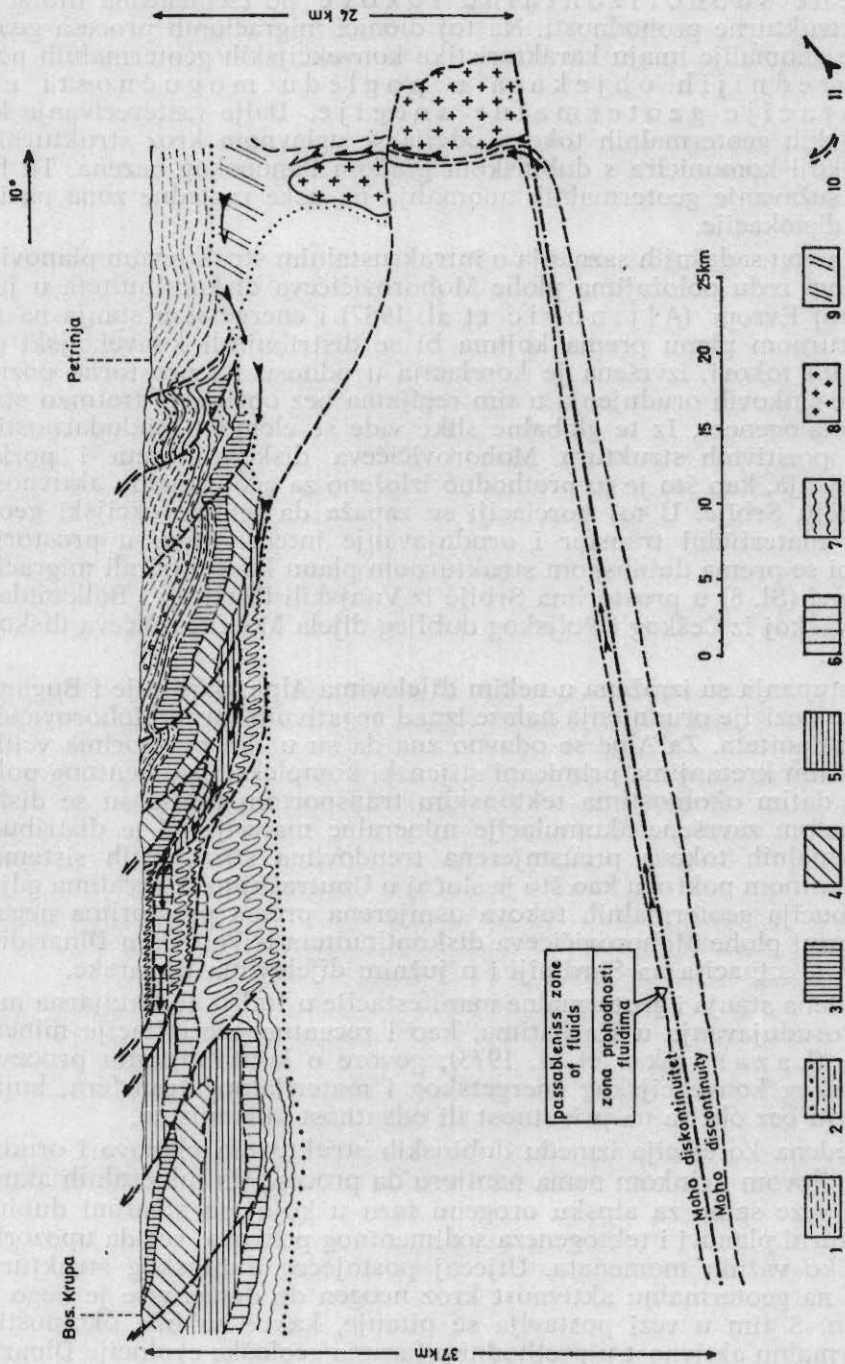
Veći dio naslaga paleozoika generalno karakterizira primarno jako niska prohodnost za konvekcijske geotermalne tokove. Kroz navlačenja okolnosti se mijenjaju. Geodinamski procesi horizontalnih kretanja frakturiraju paleozojske sedimente serije, te stvaraju sekundarnu prohodnost po rasjednim sistemima kao što je to slučaj s navlakama Petrove gore, Trgovske gore i navlakom sanskog paleozoika. No isti tektogenetski procesi koji su u jednoj fazi stimulirali prohodnost i geotermalnu aktivnost, u narednim fazama mogu dovesti (relaksacijska rasjedanja u zaleđu navlačnog fronta) do kidanja dubinske komunikativnosti i prevođenja konvekcijskih geotermalnih tokova na dublje elemente prohodnosti, čime se proces akumulacije mineralne materije u navlakama zaustavlja, kao što je to slučaj s prije spomenutim navlakama unatoč i sada prisutnog geotermalnog aktiviteta u tim prostorima (Sl. 7).

Na bazi istraživanja odnosa strukturnih sistema prema geotermalnoj aktivnosti na južnim rubovima Panonskog bazena (prostori Korduna, Banije i sjeverozapadne Bosne) izveden je zaključak da konvekcijski geotermalni tokovi potječu iz dubinskih fraktura u podlozi tercijara Panonskog bazena. U nemogućnosti direktinijeg energetskog rasterećivanja, vertikalni geotermalni tokovi na dubinskim frakturama prelaze u p r i-

Sl. 7. Šematski prikaz geoloških okolnosti u formiranju konvekcijskog geotermalnog polja i njegovog rasterećivanja.

Fig. 7. Scheme of geological environments during the formation of the convectional geothermal field and its discharge.

1 — neogen (Neogene); 2 — paleogen (Paleogene); 3 — kreda (Cretaceous); 4 — jura (Jurassic); 5 — srednji trijas (Middle Triassic); 6 — donji trijas (Lower Triassic); 7 — paleozoik (Paleozoic); 8 — intruzivno tijelo (intrusive body); 9 — geotermalno polje (geothermal field); 10 — reversni rasjedi (overthrusts); 11 — konvekcijski geotermalni tok (convectional geothermal flow).



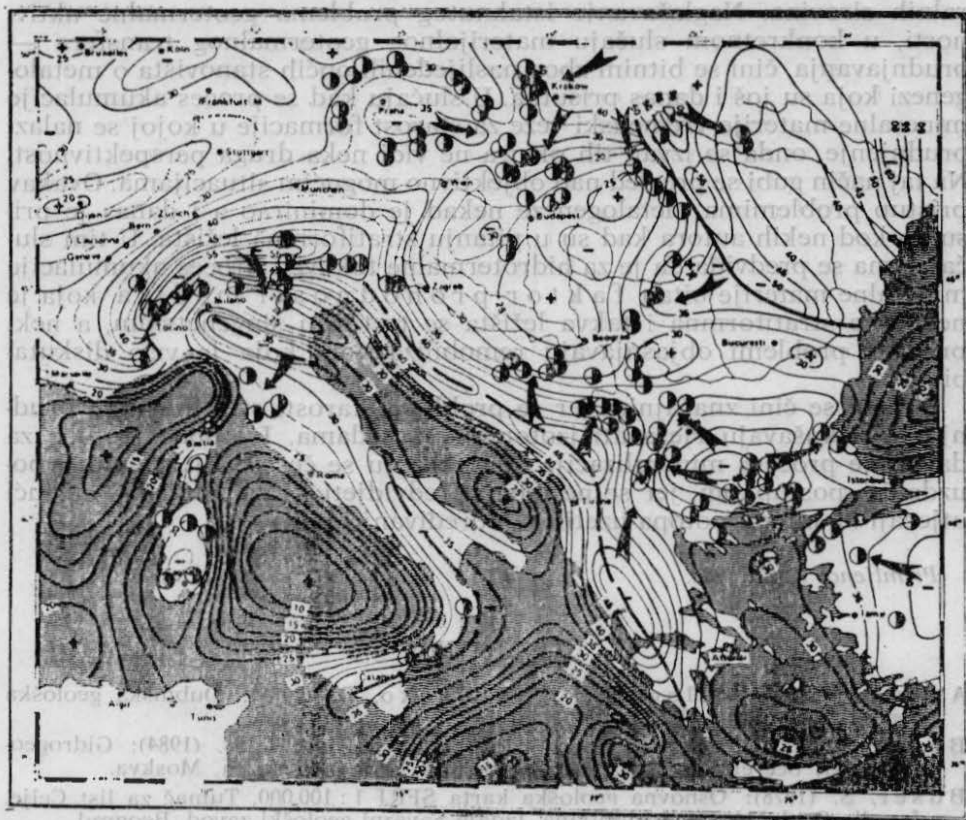
gušene subhorizontalne tokove po elementima litofacijelne i strukturne prohodnosti. Na toj dionici migracionih procesa geotermalne anomalije imaju karakteristike konvekcijskih geotermalnih polja, najvrednijih objekata u pogledu mogućnosti eksploatacije geotermalne energije. Dalje rasterećivanje konvekcijskih geotermalnih tokova odvija se uglavnom kroz strukturni sistem koji komunicira s dubinskom građom Panonskog bazena. Tu fazu prati sužavanje geotermalnih anomalija na uske rasjedne zone pa i na same dislokacije.

Na nivou sadašnjih saznanja o intrakrustalnim strukturnim planovima, u prvom redu položajima plohe Mohorovičićeva diskontinuiteta u jugoistočnoj Evropi (Aljinović et al. 1987) i energetskih stanja na tom strukturnom planu prema kojima bi se distribuirali konvekcijski geotermalni tokovi, izvršena je korelacija u odnosu na prostorne pozicije olovno-cinkovih orudnjenja u tim regijama bez obzira na tretman starosti metalogeneze. Iz te globalne slike vide se elementi podudarnosti između pozitivnih struktura Mohorovičićeva diskontinuiteta i pozicija orudnjenja, kao što je to prethodno izloženo za geotermalnu aktivnost u području Srbije. U toj korelaciji se zapaža da je konvekcijski geotermalni materijalni transfer i orudnjavanje intenzivirano u prostorima gdje bi se prema dubinskom strukturnom planu koncentrirali migracioni trendovi (Sl. 8) u prostorima Srbije iz Vanjskih Dinarida i Balkanida, te u Slovačkoj iz Češkog i Poljskog dubljeg dijela Mohorovičićeva diskontinuiteta.

Odstupanja su izražena u nekim dijelovima Alpa, Sardinije i Bugarske, gdje se pozicije orudnjenja nalaze iznad negativnih formi Mohorovičićeva diskontinuiteta. Za Alpe se odavno zna da su u tim prostorima velikim navlačnim kretanjima primicani stijenski kompleksi sedimentnog pokrova. U datim okolnostima tektonskim transportom mogle su se dislocirati netom završene akumulacije mineralne materije ili je distribucija geotermalnih tokova preusmjerena trendovima strukturnih sistema u sedimentnom pokrovu kao što je slučaj u Unutrašnjim Dinaridima gdje je distribucija geotermalnih tokova usmjerena prema prostorima negativnih formi plohe Mohorovičićeva diskontinuiteta u Vanjskim Dinaridima. Slična je situacija na Sardiniji i u južnim dijelovima Bugarske.

Izložena stanja i geotermalne manifestacije u Italiji, te tercijarna metalična orudnjavanja u Karpatima, kao i recentne precipitacije minerala olova (Lazarenko et al. 1973), govore o kontinuiranim procesima dubinskog konvekcijskog energetskog i materijalnog transfera, koji se odvijaju bez obzira na prisutnost ili odsutnost vulkanizma.

Izvedena korelacija između dubinskih strukturnih planova i orudnjavanja olovom i cinkom nema namjeru da procese tih mineralnih akumulacija veže samo za alpsku orogenu fazu u kojoj su stvarani dubinski strukturni planovi i tektogeneza sedimentnog pokrova, već da upozori na nekoliko važnih momenata. Utjecaj postojećeg dubinskog strukturnog plana na geotermalnu aktivnost kroz neogen do danas više je nego evidentan. S tim u vezi postavlja se pitanje, kakve su bile okolnosti za geotermalnu aktivnost u prethodnim fazama geološke evolucije Dinarida, kroz paleozoik i veći dio mezozoika prije velikih globalnih pokretanja ploča?



Sl. 8. Distribucija dubinskih konvekcijskih geotermalnih tokova prema Moho diskontinuitetu u odnosu na orudnjenja olova i cinka. — Prema podacima: Aljinović et al., (1987), Dimitrov (1984), Stampanoni (1973), Janković (1967), Ilarsky & Sattran (1981).

Fig. 8. The distribution of deep convectional geothermal flows according Moho discontinuity in relation of Lead and Zinc mineralization. Based on data: Aljinović et al., (1987), Dimitrov (1984), Stampanoni (1973), Janković (1967), Ilarsky & Sattran (1981).

1 — ležišta olova i cinka (Lead-Zinc deposits); 2 — distribucija konvekcijskih tokova (distribution of convectional heat flow in relation to the Moho discontinuity).

Ovo je ključno pitanje naročito kad se radi o valorizaciji nekog prostora u odnosu na mogućnosti pronalazaženja neotkrivenih ležišta mineralnih sirovina. Naglašavanje istaknutog problema geotermalne aktivnosti, u konkretnom slučaju materijalnog geotermalnog transfera — orudnjavanja, čini se bitnim zbog naslijeđenih općih stanovišta o metalogenezi koja su još i danas prisutna. U slučaju kad se proces akumulacije mineralne materije vremenski veže za starost formacije u kojoj se nalazi orudnjenje, onda se izvan tih okvira ne vidi neka druga perspektivnost. Na taj način gubi se pregled nad objektivno mogućim situacijama. Ovakav pristup problemima metalogeneze nekad je dominirao a i danas je prisutan kod nekih autora kad su u pitanju stratiformna ležišta. U tim slučajevima se predviđa da je za hidrotermalne tokove i proces akumulacije mineralne materije bitan faktor prohodnosti medija koja je nerijetko stratiformna i takva ležišta se tretiraju singenetskim, a neki prisutni problemi objašnjavaju remobilizacijom koja je vrlo diskutabilna.

Pitanje se čini značajnim jer se problemi starosti stratiformnih orudnjenja pokušavaju rješavati izotopnim metodama. Izotopne metode za datiranje procesa mineralizacije ne pokazuju se često objektivnim i pouzdanim postupkom, jer se ne mogu predvidjeti i izračunati svi mogući utjecaji na odnos izotopa uzetih za određivanje starosti.

Primljeno: 8. 12. 1988.

LITERATURA

- Aljinović, B., Prelogović, E. & Skoko, D. (1987): Dubinska geološka građa. *Geol. vjesn.* 40, 255—263, Zagreb.
- Borevskij, L. V., Vartanan, T. V. & Kulikov, T. V. (1984): Hidrogeologičeskij očerek. Kolskaja sverhglubokaja, 240—245, Nedra, Moskva.
- Buser, S. (1978): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Celje. Izradio Geološki zavod Ljubljana. Izdaje Savezni geološki zavod, Beograd.
- Čičić, S. & Miošić, N. (1986): Geotermalna energija Bosne i Hercegovine. »Geoinženjering« Sarajevo, p. 205, Sarajevo.
- Dangić, A. (1979/80): Geohemija hidrotermalne alteracije stena oko sulfidnih mineralizacija i evolucija hidrotermalne aktivnosti na primjeru Srebrenice i Kišnice. *Geol. anali Balkan. pol.*, 43/44, 359—509, Beograd.
- Dimitrov, D. K. (1984): Map of Lead-Zinc Deposits in the Alpine folded belt of SE Europe and SW Asia, 1:2,500,000. Committee of Geology of Peoples Republic of Bulgaria, Sofia.
- Dragašević, T. (1973/74): Savremena građa zemljine kore i gornjeg omotača na području Jugoslavije. *Vesnik*, 14/15, 41—51, Beograd.
- Emery, K. O., Hunt, J. M. & Hays, E. E. (1969): Hot Brines and Heavy Metal Deposits in Red Sea — Summary. Springer-Verlag, 567—371, Berlin—Heidelberg—New York.
- Galdin, N. E., Ljubimova, V. D., Nartikoev, V. D., Popov, J. A., Semaško, S. A., Skornjakov, V. M. & Smirnova, E. V. (1984): Teplovie svojstva parod. Kolskaja sverhglubokaja, 349—381, Nedra, Moskva.
- Grafenauer, S. (1966): The genetic classification of the Lead and Zinc Deposits in Slovenia. *Rud. metal. zb.* 2, 33—42, Ljubljana.
- Ilarsky, J. & Sattlan, V. (1981): Metalogenetička mapa ČSSR 1:500.000. Ustredny ustav geologicky — Geologicky ustav Dionyza Stura, Prag.
- Janković, S. (1967): Metalogenetske epohe i rudonosna područja Jugoslavije. 1—17, Beograd.

- Lazarenko, F. K. (1973): Metalogenija Karpat. *Naukova dumka*, 129, Kijev.
- Milovanović, D. (1979/80): Proučavanje hidrotermalnih promjena u slivu Borske reke. *Geol. anali Bal. pol.*, 43/44, 511—529, Beograd.
- Mioč, P. (1982): Tektonski odnosi savske navlake prema susjednim jedinicama u Sloveniji te njena veza sa širim jugoslavenskim područjem. *Radovi znanstv. sav. za naftu JAZU, ser. A, 10*, 33—38, Zagreb.
- Nosan, A. (1973): Termalni in mineralni vrelni v Sloveniji. *Geologija*, 16, 5—81, Ljubljana.
- Panichi, C. & Squarci, P. (1982): Carta delle temperature sotterranee in Italia. Consiglio nazion., delle ricerche. Firenze.
- Perić, J. & Milivojević, M. (1979/80): Potencijalnost teritorije uže Srbije za iznaženje ležišta geotermalne energije. *Geol. anali Balk. poluo.* 43/44, 531—554, Beograd.
- Perić, J. & Milivojević, M. (1982): Geotermalna potencijalnost granodioritskog plutona Boranje i mogućnosti eksploatacije geotermalne energije. 10. Jugosl. geol. kongres, 3, 203—219, Budva.
- Perić, J. & Milivojević, M. (1986): Geotermalna potencijalnost Mačve, Semberije i Srijema. 11. Jugosl. geol. kong., 5, 201—216, Tara.
- Premru, U. (1983): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Ljubljana. Izradio Geološki zavod Ljubljana. Izdaje Savezni geološki zavod, Beograd.
- Rakovec, I. (196): Pregled tektonske zgradbe Slovenije. 1. Jugosl. geol. kong., 73—83, Ljubljana.
- Sliškočić, I. (1986): Novi geotermalni potencijali u području Kaknja. XI Kongr. geol. Jugosl., knj. 5, 217—237, Tara.
- Stampanoni, G. (1973): Carta mineraria d'Italia, 1:1,000,000. Servizio geologico d'Italia, Roma.
- Sušnjar, M. (1983): Tektogenetski procesi u Dinaridima i pojave pozitivnih geotermalnih anomalija. *Geol. vjesn.* 36, 223—239, Zagreb.
- Sušnjar, M. & Grimani, I. (1986): Strukturno-tektonski odnosi ofiolitskog pojasa Banije. *Geol. vjesn.* 39, 109—119, Zagreb.
- Vernik, L. I., Kuznecov, J. I., Medvedev, R. V. & Turčaninov, I. A. (1984): Fiziko-mehaničeskie svojstva Kolskaja sverhglubokaja, 349—371, Moskva.

Problems of the geothermal geology of the Dinarides as related to tectogenesis

M. Sušnjar

An approach to the problems of geothermal geology and exploration is draft on the standpoint which complexly comprises all manifestations and effects of the deep interior influences in the sedimentary cover disregarding if they are reflected as the energetic or material depth transfer. Because of that the main attention is focused upon the processes and circumstances which insure deep interior openings in the pertinent regional geological framework. Based on this approach, a brief critical review on the treatments of the geothermal geology and single problems will be given.

The present level of our knowledge makes possible to separate the three significant elements of geothermal problematics existing with disputable standpoints. They are as follows: (1) the direct source of heat, (2) the nature of the heat transfer of geothermal anomalies, and (3) the origin of a transport agent for convective heat flows.

Some authors (Čičić & Miošić, 1986; Perić & Milivojević, 1982) emphasize in the estimation of the heat sources the presence of igneous bodies in geological structure of the Dinarides as the objects of their own heat emission. The

exploration drilling in such a plutonic object of the post-cretaceous age did not prove these opinions and the obtained results indicate that the termomineral springs in the area of plutonic body belong to a convectional heat transfer. This situation is quite logic if the post-intrusive phases are analyzed. Solidification of the magmatic body was followed by a volume decrease and fracturing. These processes gave rise to the passableness which connects the spaces of different energetic states and thus ensure the migration of fluids through the magmatic body and through the contact zone.

Convectional and conductive nature of the heat transfer commonly accounts for the generation of a single geothermal anomaly. The present experience and results obtained by geothermal drilling did not register in any case a geothermal anomaly brought about by the conductive heat transfer. As a rule, after a geothermal anomaly is cut through by the drilling, the temperature does not increase by the depth and in some cases it even decreases. This is quite understandable if the controlling factors of tectogenetic processes and structural systems are studied in detail. The high degree of tectonization of the rock complexes of the Internal Dinarides accompanied by horizontal displacement gave rise to the pronounced structural passableness which insured the predominant convectional heat transfer in the generation of geothermal anomalies (Šušnjarić, 1983).

The explanation of the origin of transport agents for convectional heat flow represents the most controversial part of the geothermal problematics. Most of the authors (Čičić & Miošić, 1986; Perić & Milivojević, 1986, 1986; Slišković, 1986) explain the problem of the origin of fluids by the infiltration of surface waters and water replacement. But something is overlooked by such explanations. A deep interior convectional heat flows starts under the conditions of geostatic pressures. The migration itself gives rise to the discharge with a tendency of approaching the hydrostatic pressures. There are no theoretical possibilities that the fluids of a lower energetic system can be transferred to a higher energetic system in all phases of migration processes till the equalizing hydrostatic pressure is maintained. The mixing of surface and deep interior fluids takes place only in the zone where the pressures become equal. In this phase and under such circumstances commences a more significant degradation of the heat flow but not yet the genesis of a geothermal anomaly. The possibility of water replacement on the basis of temperature and density differences can also be overlooked. Even in completely open systems under hydrostatic pressure conditions, deep interior mineralized hydrothermal flows do not mix with cold waters on the theoretical principle of water replacement what is proved by some facts in the Red Sea area (Emery et al., 1969). Here, there exist for many years at the depth of 2.100 m a zone of highly mineralized solution with the temperature of 56 °C whose static states are reflected on the echosonder as well.

Basic carriers of the convectional heat flow are deep interior magmatogenic and metamorphogenic fluids accompanied in some cases by sedimentogenic fluids of the last phases of migration. The latter can be represented by the basins with Tertiary sediments overlying the basement in which the processes of diagenesis and generation of the free water still take place.

Deep exploration drillings in the Kola Peninsula in the area of Baltic Shield gave new informations on the state and processes in the deep fundament. Several very important facts have been found out: (1) the presence of fluids of a high energy and of a high degree of mineralization (Boverski et al., 1984) which form a convectional heat flow (Fig. 1); (2) the passableness of structural systems is still present under such circumstances, and (3) the degree of rock crushing is increased several times by the depth (Vernik et al., 1984).

Data obtained by this exploration indicate that despite the absence of actual tectonic and magmatic activity is characteristic for Baltic Shield, the processes of deep interior energetic and material transfer of the variable intensity continuously take place. This is predisposed by (1) the possibility of hydrofracturing under geostatic pressures; (2) the increased crushing of rocks by the depth, and (3) the high aggression of deep interior fluids. The mentioned factors enable the convectional passableness in deeper parts of the crust which continuous generation of fluids takes place. Magmatic extraction of volatiles, migmatization and metamorphism are the permanent generators of the convectional transfer agents. Some authors (Borevsky et al., 1984 and others) emphasize that the metamorphism from greenschist to amphibolite facies rocks is accompanied by the excess of

water of about 2 percent in the source rock. This represents a huge deep interior hydropotentiality which supplies the pronounced presence of the convectational geothermal transfer in the lithosphere.

The conventional geothermal flows can be increased by many reasons in tectonic active belts, as for example, the Alpine orogenic belt. The first reason is in the deep crustal structuration with a new arrangement of the energetic states within the crust. This brings about the distribution of the deep interior migration flows directed to the spaces of a lower energy what gives rise to concentrated migration processes. Geodynamic tension and tectonic transport produce new elements of the permeability both in the deep fundament and sedimentary cover.

Recent data (Šušnjar, 1983; Šušnjar & Grimani, 1986) on the relationship between tectogenetic processes and manifestation of the deep interior influences in the Dinarides indicate that the convectational geothermal flows from the Pannonian basin extended along structural systems towards the External Dinarides. These directions are opposite to the deep interior migration trends which are turned towards the shallower parts of the Mohorovičić discontinuity. Quite the same relations can be found in the area of Tyrrhenian Sea (Fig. 2).

The correlation between the geothermal anomalies and the location of Pb, Zn, Hg and Cu mineralization in the area of Tuscany and Latium indicates that the processes of convectational energetic and material transfer are united and synchronous and that they are founded on the deep interior migration of fluids (Fig. 3). The geothermal activity is connected with geological evolution of the Tyrrhenian Sea during the Neogene. Neogene sedimentary cover of the Tyrrhenian Sea makes impossible the discharge of convectational geothermal flows beneath it and thus they return into the continental part, i. e. the area of the intensive tectonization of Neogene sediments. That is the reason why the Neogene sedimentary complex is also comprised by the mineralization.

The relations between the deep structure elements on the seismic cross-section Petrovac/m — Negotin (Dragašević, 1973/74) and the possible distribution of the deep convectational geothermal flows have been analyzed. The arrangement of the energetic states along the Mohorovičić discontinuity indicates the distribution of migration of the deep interior fluids extending from the area of the External Dinarides towards the Internal Dinarides and Vardar zone (Fig. 4).

The correlation between the projections of deep interior structures and the geothermal manifestations is of a particular interest on a part of the seismic cross-section Novi Pazar — Negotin where it is the most pronounced convectational energetic and material transfer in Yugoslavia (Fig. 5a and 5b). The thermomineral springs with the highest temperatures and mineralization produced by the geothermal material transfer are located above deep fractures with the shortest way of communication with the Mohorovičić discontinuity.

The effects of tectogenetic processes and existing structural systems on the convectational geothermal activity is best illustrated by the correlation between the structural systems of the sedimentary cover and the spatial distribution and the state of thermal springs and mineralization in the eastern part of Slovenija (Figs. 6a and 6b). The tectogenetic processes with the pronounced thrust movements overlie the Ophiolite belt and thus gave rise to two thrust sheets (etages) in this part of Slovenija. This structure does not stimulate a significant geothermal activity which is manifested in lower effects of the energetic and material transfer.

Tectogenetic processes which took place along the southern margin of the Pannonian basin have been also analyzed. They were in the function of the geothermal activity and the development of geothermal anomalies during the Neogene till the present days. The evacuation on pre-Neogene sedimentary cover from the Pannonian basin with the Neogene sedimentation over the exposed fundament produced the conditions for the formation of the convectational geothermal field in the passable parts of the present lithofacies complexes. The discharge of geothermal flows takes place through the structural system communicated with the deep structure of the Pannonian basin (Fig. 7) and the flows extend towards the External Dinarides. The evolution of tectogenetic processes of this area indicates the phases by which the deep interior structure was broken; geothermal flows are conveyed into the deeper parts of the passable zone what produced consequences in the intensity of material transport and accumulation of mineral substance.

The areas with Neogene cover, where subducted energetic discharges of the deep interior geothermal flows produced convectational geothermal fields, re-

present the most valuable objects with the possibilities of the exploitation of geothermal energy in Yugoslavia. Further discharges of the geothermal flows from the geothermal fields extends along structural systems towards the External Dinarides. The geothermal flows of these parts are directed to fault zones and faults themselves and thus geothermal anomalies obtained a local importance with the decreased exploitation possibility accompanied by more complex exploration works.

On the basis of the presented evaluation of the significance of the deep interior structure in the geothermal activity, the additional correlation between the position of the Mohorovičić discontinuity in the southeastern Europe (Aljinović et al., 1987) and the distribution of lead-zinc mineralization of this area was made, disregarding previously determined age of the metallogenesis (Fig. 8). This regional and generalized figure demonstrates the coincidence between the positive parts of relief of the Mohorovičić discontinuity and the geothermal material transfer, i. e. mineralization as it was presented for the situation in Serbia. On the basis of this correlation it could be recognized that the mineralization is more intensive in the areas where the migration flows should be concentrated due to the deep interior structure, i. e. in the area of Serbia from the Dinarides and Balkanides, and in Slovakia from the subsided part of the Mohorovičić discontinuity in Bohemia and Poland.

The departure from this correlation is manifested in the Western Alps, Sardinia and Bulgaria. It has long been known that above the subsided parts of the Mohorovičić discontinuity in the Alps the rocks of the sedimentary cover are displaced by thrusting processes. The formed accumulations of the mineral substance might have escaped under such circumstances. Another, more probable, possibility is that the structural systems of the tectonic transport controlled also the geothermal flows during tectogenetic processes until the recent time. Indications of thrusting movements from the south to the north in Bulgaria and towards the west in Sardinia should have same effects as in the Alps.

The presented correlation does not pretend to treat all the mineralization as products of the Alpine metallogeny but to emphasize some more important factors. Effects of the existing deep interior structural systems on the geothermal activity during the Neogene till the present time are more than obvious. But the questions — under which circumstances did the geothermal activity with material transfer in earlier phases of geological evolution of the Dinarides take place, during the Paleozoic and most of the Mesozoic, before more intensive and global plate movements started?

This question seems to be significant because there still exist numerous unexplained problems on the metallogenesis of separate ore deposits, particularly the stratiform ones, located in the ancient geological formations where there are not conditions for the realistic definition of temporal parameters. Isotopic methods for the dating of mineralization processes frequently do not give realistic and reliable results because all possible influences on the isotope ratios taken for an age determination cannot be predicted and calculated.