

Geol. vjesnik	30,	745—755	5 sl. u tekstu, 3 table	Zagreb, 1978
---------------	-----	---------	-------------------------	--------------

550.34:551.24:551.79(497.1)

O uzročnoj vezi neotektonskih gibanja i seizmičke aktivnosti u SR Hrvatskoj

Eduard PRELOGOVIĆ,¹ Dragutin CVIJANOVIĆ² i Dragutin SKOKO²

¹Zavod za inženjersku geologiju, hidrogeologiju i geologiju nafte i ugljena, Rud.-geol.-naftni fakultet, Pierottijeva 6, YU-41000 Zagreb

²Geofizički zavod Prir.-mat. fakultet, Grič 3, YU-41000 Zagreb

Posljednjih nekoliko godina u nas se vrše intenzivnija seizmotektonska istraživanja. Od dosad dobivenih rezultata osobito su značajne mogućnosti seizmoloških istraživanja u otkrivanju recentnih tektonskih gibanja i neotektonskih parametara u procjeni seizmičke aktivnosti.

UVOD

Povezanost seizmoloških i geoloških istraživanja u nas datira još s kraja prošlog stoljeća. Seizmologija je započela svoj razvoj u okviru geologije. U Hrvatskoj ovo jedinstvo geologije i seizmologije bilo je potpuno i sjedinjeno u jednom čovjeku — Kišpatiću. On je pune 24 godine dokazivao, na primjerima potresa u Hrvatskoj, da iste sile koje djeluju na stvaranje gora uzrokuju i potrese (1891—1906). Ovo poimanje nastanka potresa potvrdili su Mohorovičić (1906), Gorjanović-Kramberger (1907) i Mokrović (1950). Razvojem instrumentalne seizmologije započelo je razdoblje udaljavanja ovih dviju znanstvenih disciplina. Između 30-ih i 40-ih godina ovog stoljeća pojavljuje se nova interdisciplinarna znanstvena grana — seizmotektonika, koja ujedinjuje seizmologiju, geologiju i geofiziku s ciljem istraživanja i objašnjavanja gibanja i procesa u unutrašnjosti Zemlje. Rezultati se primjenjuju u praksi za zaštitu od razornog djelovanja potresa. U nas su takva istraživanja započeta tek u okviru međunarodnog projekta »Izučavanje seizmičnosti Balkanskog poluotoka« (Arsovski et al., 1974a, 1974b; Bašović et al., 1974a, 1974b; UNDP/UNESCO, 1974, 1974a), koji je trajao od 1970. do 1976. godine.

Rad na tom projektu bio je podstrek za detaljnije utvrđivanje seizmičnosti i seizmotektonskih odnosa (Cvijanović, 1976; Cvijanović et al., 1974, 1976a, 1976b; Kranjec & Prelogović, 1974; Prelogović, 1975; Prelogović & Cvijanović, 1976a, 1976b; Skoko et al., 1976).

U današnjoj fazi proučavanja pažnju privlači mehanizam tektonskih kretanja u pojedinim epicentralnim područjima i odnos neotektonske

aktivnosti i pojava potresa. Za određivanje maksimalno mogućih magnituda potresa i seizmičnog zoniranja nisu dovoljne samo seizmološke informacije, već se posize za dodatnim podacima, npr. geološkim, geodetskim i gravimetrijskim. Ovom prilikom bit će prikazani neki primjeri koji upućuju na uzajamnu uzročnu povezanost neotektonskih gibanja i seizmičke aktivnosti u Hrvatskoj, te postupak određivanja maksimalno mogućih magnituda potresa prema geološkim podacima.

NEOTEKTONSKA ISTRAŽIVANJA

U dosadašnjim neotektonskim istraživanjima veća pažnja posvećena je vertikalnim i horizontalnim pokretima, zatim rasjedima, te geološkom razvitku pojedinih tektonskih jedinica i krupnih blokova i vremenu najveće tektonske aktivnosti. Neotektonska rajonizacija (tabla 1) načinjena je na temelju tektonskih pokreta u neogenu i kvartaru. U Panonskom bazenu posebno se ističu: zona diferenciranih pokreta (Ib), zona struktura medvedničko-kalničkog pružanja (Ic), Murska potolina (Id) i južna rubna zona (Ia). Unutar Panonskog bazena izdvojeni su predjeli, gdje amplitude spuštanja prelaze -3000 m (najviše oko -7000 m). Jugozapadno slijedi prijelazna zona (IIa) prema području najvećeg neotektonskog izdizanja (II). U tom području prosječne amplitude izdizanja su iznad 500 m. Pojedini krupni blokovi neotektonski su uzdignuti više od 1.000 m. Sjeverna Istra, otoci i Ravni Kotari predstavljaju prijelaznu zonu prema Jadranskom bazenu s manjim amplitudama izdizanja (IIb). U ostalom dijelu Istre neotektonski pokreti su posve malih amplituda, najviše između 50 i 100 m. Jadranski bazen (III) predstavlja areal spuštanja, koja traju kroz cijelu neotektonsku etapu. Amplitude spuštanja su mjestimično veće od -3000 m (najviše oko -6000 m).

Neotektonska horizontalna gibanja znatno je teže utvrditi od vertikalnih. Kod toga je posebno važno kretanje većih jedinica i blokova, i to po uzdužnim ili poprečnim rasjedima. Od poprečnih rasjeda izdvajaju se dva pravca pružanja: sjeveroistok—jugozapad i sjever—jug. U epicentralnim područjima gotovo uvijek ustanovljeno je horizontalno pomicanje pojedinih blokova.

Primjena neotektonskih istraživanja u seizmotektonskim istraživanjima ogleda se u izračunavanju mogućih maksimalnih magnituda potresa. Pri tom je primijenjen postupak čiji su rezultati u zadovoljavajućoj suglasnosti s empirijskim vrijednostima. Za razmatrani problem općenito vrijedi slijedeće:

- a) potresi će se događati u područjima gdje su se već dogodili;
- b) potencijalne zone žarišta potresa su granice blokova aktivnih unazad nekoliko tisuća godina;
- c) gornja granica magnituda proporcionalna je dimenzijama aktivnog rasjeda i intenziteta recentnog gibanja.

Uz te opće pretpostavke za izračunavanje maksimalno mogućih magnituda potresa, uzeti su u obzir slijedeći elementi:

- 1) amplitude neotektonskih pokreta;
- 2) amplitude kvartarnih i recentnih pokreta;
- 3) uzdužni i poprečni rasjedi;
- 4) tektonski labilni predjeli i zone preoblikovanja;
- 5) sjecište rasjeda različitih pravaca pružanja.

Daljnja pretpostavka odnosila se na kvantitativno određivanje odnosa maksimalne magnitude potresa M i geoloških elemenata t_i ($i = 1, 2 \dots 5$). Uzelo se da je doprinos φ_i svakog elementa oblika:

$$\varphi_i = a_i \cdot t + b_i \cdot t^2 \quad (i = 1, 2 \dots 5)$$

Maksimalna magnituda M potresa može se izraziti kao kubna funkcija sume S doprinosa φ_i geoloških elemenata:

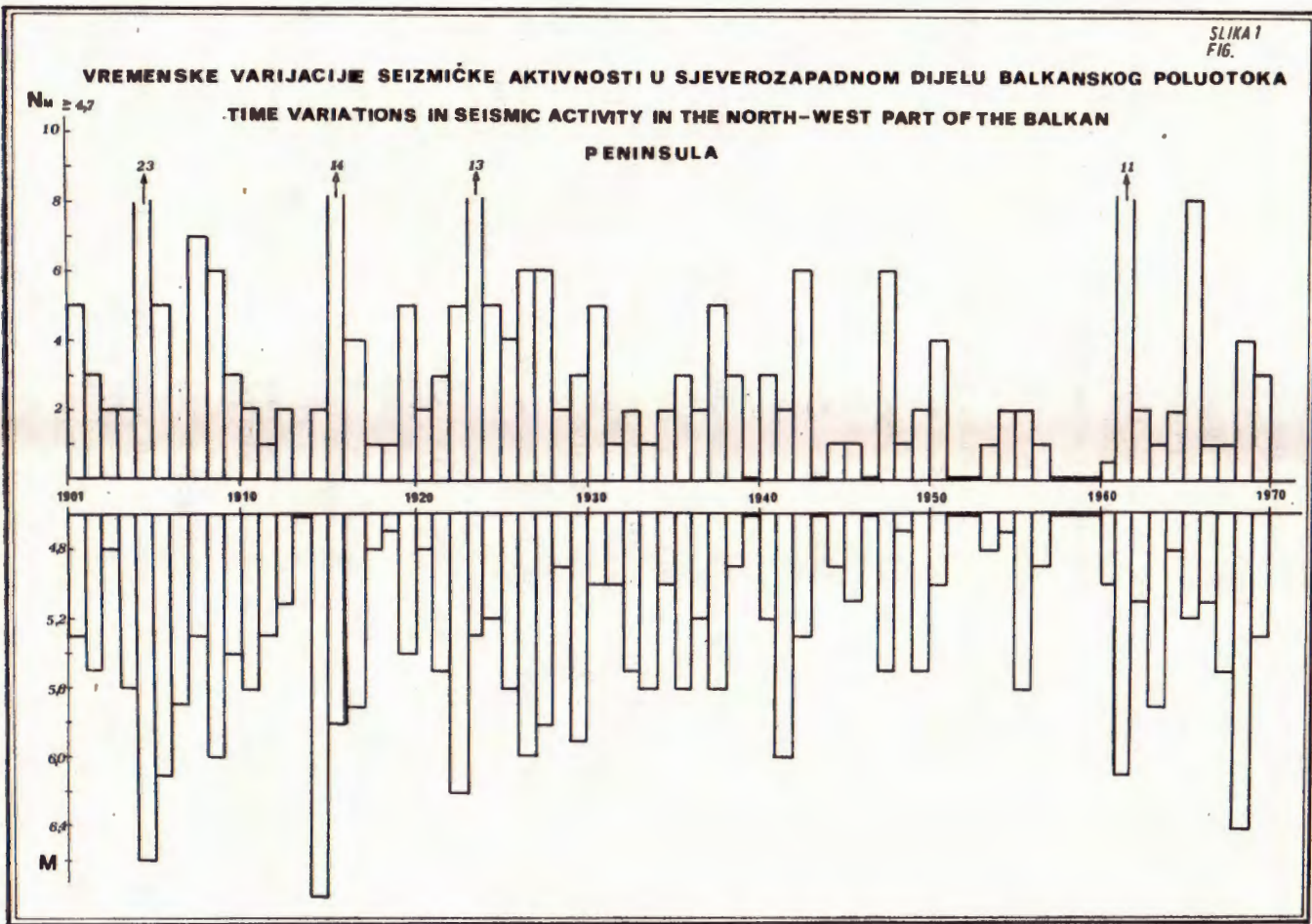
$$M = c + S + dS^2 + eS^3,$$

$$\text{gdje je } S = \sum_{i=1}^5 \varphi_i$$

Da se na osnovi tih izraza mogu veličine M izračunavati, potrebno je prethodno utvrditi iznose konstanta a_i , b_i , c , d i e . To je urađeno metodom najmanje sume kvadrata odstupanja empirijskih vrijednosti magnituda potresa (ukupno 42 točke područja Hrvatske) od veličina određениh tim jednadžbama. Pokazalo se pri tom da je standardna devijacija tih odstupanja $\pm 0,3$ jedinica magnitude, što je zadovoljavajuće. Iznosi maksimalno mogućih magnituda potresa na osnovi samo geoloških kriterija za cijelo područje SR Hrvatske usporedili su se s empirijskima. Uz pojedina odstupanja, utvrdila se zadovoljavajuća podudarnost. To je bio razlog da se ti podaci ukomponiraju zajedno sa seizmološkima u jedinstvenu seizmološku kartu područja SR Hrvatske (Cvijanović et al., 1976a). Činjenica je da bi uključivanje dodatnih podataka poboljšalo dobiveni rezultat. To se posebno odnosi na podatke sile teže, dubine Mohorovičićeva diskontinuiteta i slično. Tablom 2 predstavljena je dobivena karta maksimalnih magnituda potresa prema geološkim podacima. U crtane su samo izolinije s vrijednostima magnituda 5,0 (Jadransko more), 5,5 i 6,0. Usporedbe radi predočene su i maksimalne magnitude potresa prema seizmološkim podacima.

SEIZMOLOŠKA ISTRAZIVANJA

Potresi u našim područjima imaju sličan karakter pojavljivanja kao i drugdje u svijetu. Uočavaju se razdoblja pojačane i smanjene seizmičke aktivnosti (slika 1). Primjerice od 1905. do 1928. godine je razdoblje pojačane seizmičke aktivnosti, zatim sve do 1962. prevladava smirivanje, a od 1962. do danas slijedi pojačana seizmička aktivnost. Oslobođanje seizmičke energije je skoro trenutačno u odnosu na mirovanja ili pripreme. Najčešće se ta energija oslobađa kao jedan, katkad dva,



rjeđe tri i više jakih, te manjeg ili većeg broja slabijih naknadnih potresa, koji traju nekoliko dana, mjeseci ili godina. Ovakav način nastajanja potresa dovodi se u vezu s aktiviranjem jednog, dva ili više rasjeda, a broj naknadnih potresa s razlomljenošću blokova u kojima su žarišta potresa. Primjeri su slijedeći:

- a) Banja Luka — dva jaka potresa, dva nešto slabija potresa i veći broj naknadnih potresa;
- b) Vinodol i Medvednica — dva jaka potresa i veći broj naknadnih potresa;
- c) Dilj gora i Bilogora — jedan jaki potres i manji broj naknadnih potresa;
- d) Psunj, Medvednica, Ljubljana — jedan jaki potres i veći broj naknadnih potresa;
- e) Pokuplje i Sibenik — veći broj jačih potresa i veći broj naknadnih potresa.

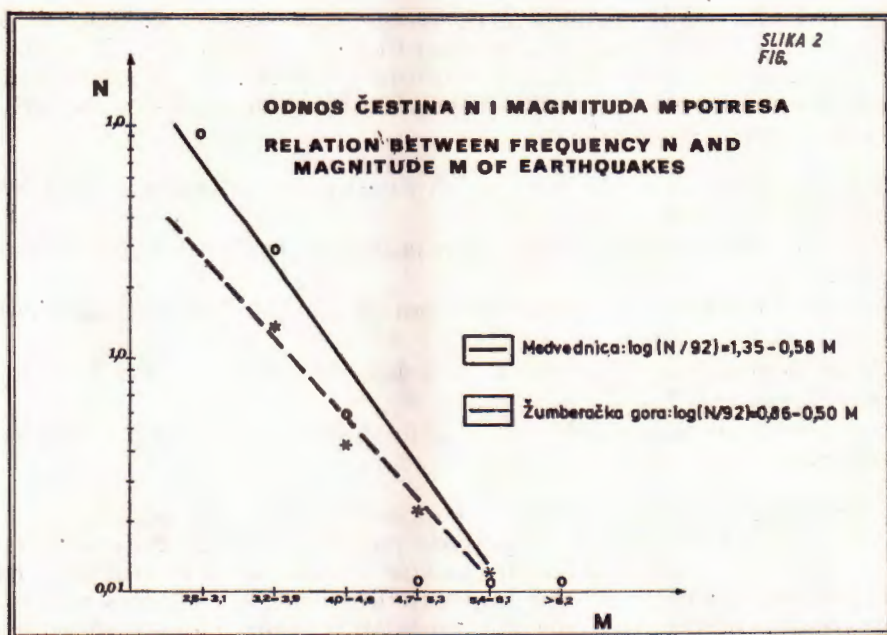
U Hrvatskoj je jasno izdvajaju koncentracije žarišta potresa, što se uočava u karti maksimalnih magnituda potresa (tabla 2). Po karakteru i nivou seizmičke aktivnosti izdvaja se više epicentralnih područja. U najvećem dijelu Hrvatske procesi koji uvjetuju nastanak potresa su takvi, da ne nastaju potresi jači od IX. stupnja MCS skale, odnosno magnitude oko 6,0. Oko Dubrovnika, Boke Kotorske i Skadra mogući su potresi X. stupnja MCS skale, odnosno magnitude oko 6,5. Zakonitost odnosa čestine N i magnitude M potresa daje mogućnost uspoređivanja nivoa seizmičke aktivnosti pojedinih epicentralnih područja (slika 2).

U istočnom dijelu Hrvatske postoji dobra korelacija u seizmičkoj aktivnosti glavnih epicentralnih područja: Dilj gore, Psunja i Bilogore. U razdobljima pojačane seizmičke aktivnosti 1884, 1908. i 1964. godine redovito je migracija seizmičke aktivnosti bila u smjeru od istoka prema zapadu uz intervale vremena od 39 dana do dvije godine. U južnom Jadranu ustanovljena je migracija pojačane seizmičke aktivnosti od sjeverozapada prema jugoistoku.

SEIZMOTEKTONSKA ISTRAŽIVANJA

Značajne su mogućnosti određivanja mehanizma pokreta u žarištu potresa prema seizmološkim podacima (tabla 3). Os A označava orijentaciju rasjeda po kojem je vršen pomak. Os P je smjer kompresije, a T dilatacije. Kod nekih rasjeda ustanovljen je horizontalni pomak. U Jadranskom moru smjer potiska u dubini je prema sjeveroistoku i u centralnom i južnom dijelu, te prema sjeveru uz Istru (slično kao i u Furlaniji). Kompresioni režim na području Balkana ide od Alpa uz Jadransko more prema Grčkoj, dok je režim dilatacije najizraženiji u Egejskom moru (Ritsema, 1974).

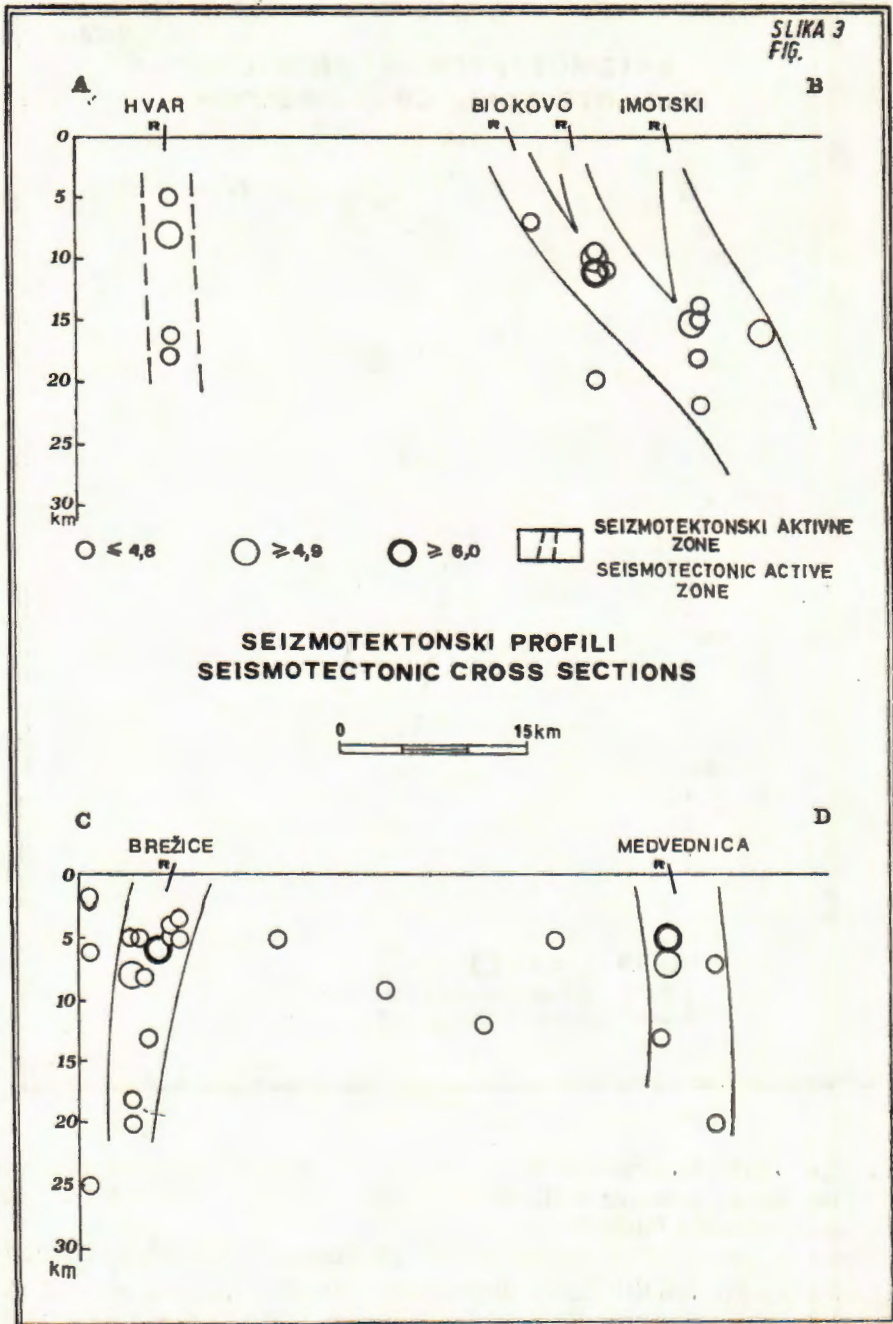
Seizmotektonska aktivnost najizraženija je u dodirnoj zoni Jadranskog bazena i Dinarida. U unutrašnjem dijelu Hrvatske ističe se šire područje sukobljavanja medvedničko-kalničkih struktura i rasjeda sa struktura-

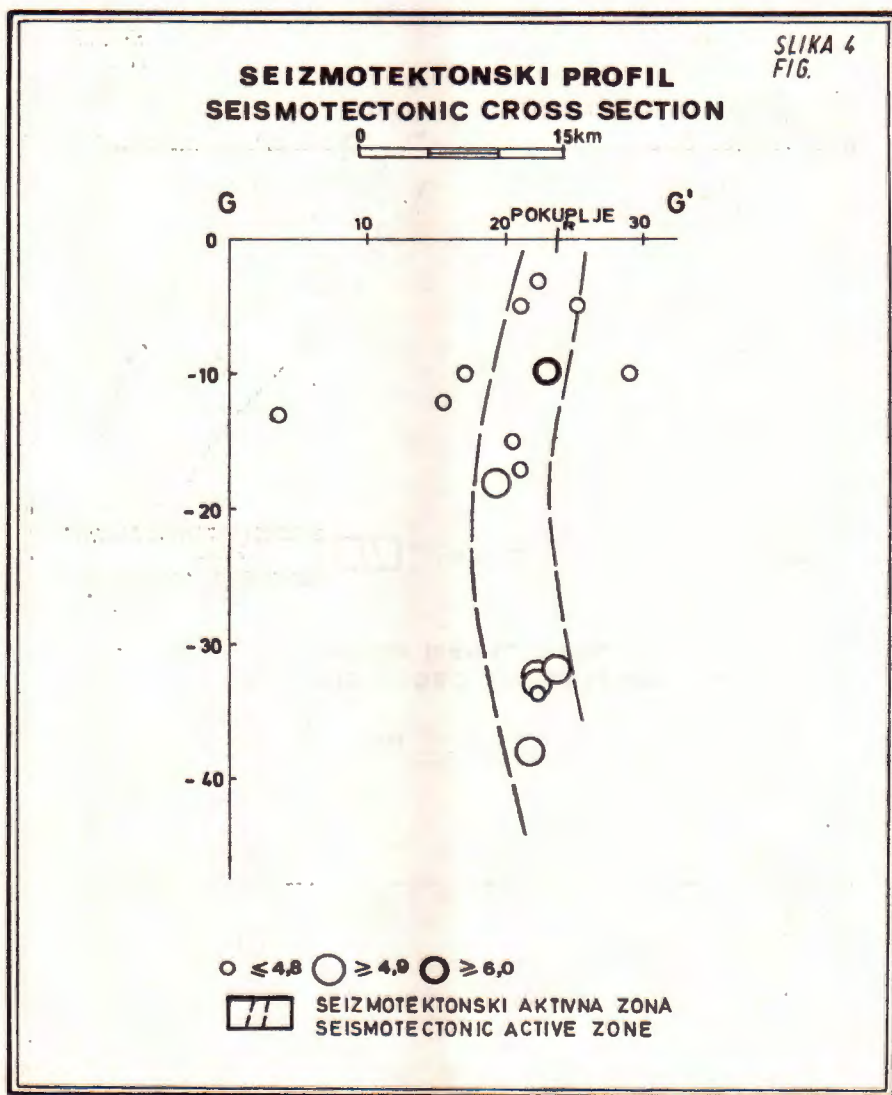


ma i rasjedima Savske i Dravske potoline, zatim južni granični dio Panonskog bazena, i pojedine zone vezane uz rubove istaknutih horstova. Potresi se najčešće javljaju na sjecištima većih rasjeda različitog pravca pružanja ili na mjestima konvergencije rasjeda. U dinamičkim kretanjima zemljine kore sjecišta rasjeda predstavljaju točke koje se odupiru pritiscima nastalima uslijed kretanja susjednih blokova. Stoga u njihovim širim zonama dolazi do sekundarnog rasjedanja i stvaranja novonastalih struktura. Regionalni rasjedi obično čine širu zonu. Ukoliko se javljaju epicentri potresa tada oni obilježavaju granice tih zona. U slici 3a profilom je predočena seizmotektonski aktivna zona u okolici Makarske. Južni i sjeverni »biokovski rasjed«, te »imotski rasjed« su reversni. Seizmotektonski aktivna zona je strma, a najveći broj hipocentara potresa javlja se u zoni spajanja tih rasjeda. U Panonskom bazenu prevladavaju strukture tipa horstova i graba. U slici 3b prikazan je dijagonalni profil preko medvedničkog i brežičkog epicentralnog područja. Prostorni raspored žarišta ukazuje na strmi nagib seizmotektonski aktivne zone. Najveća koncentracija žarišta potresa je između 5 i 6 km dubine u Medvednici i 5 do 8 km u Brežicama. Ipak, rasjedi uz horstove nisu uvijek normalni. U Pokuplju, seizmotektonski aktivna zona, paralelna uzdužnom rasjedu, povija u dubljim dijelovima. To vjerojatno znači da su i rasjedi na tim dubinama u stvari reversni (slika 4)

Potresi ne moraju biti isključivo raspoređeni uz trase regionalnih rasjeda. Primjerice u široj zoni između bilogorskih i kalničkih struktura većina epicentara potresa nalazi se u okolici Koprivnice između Drave

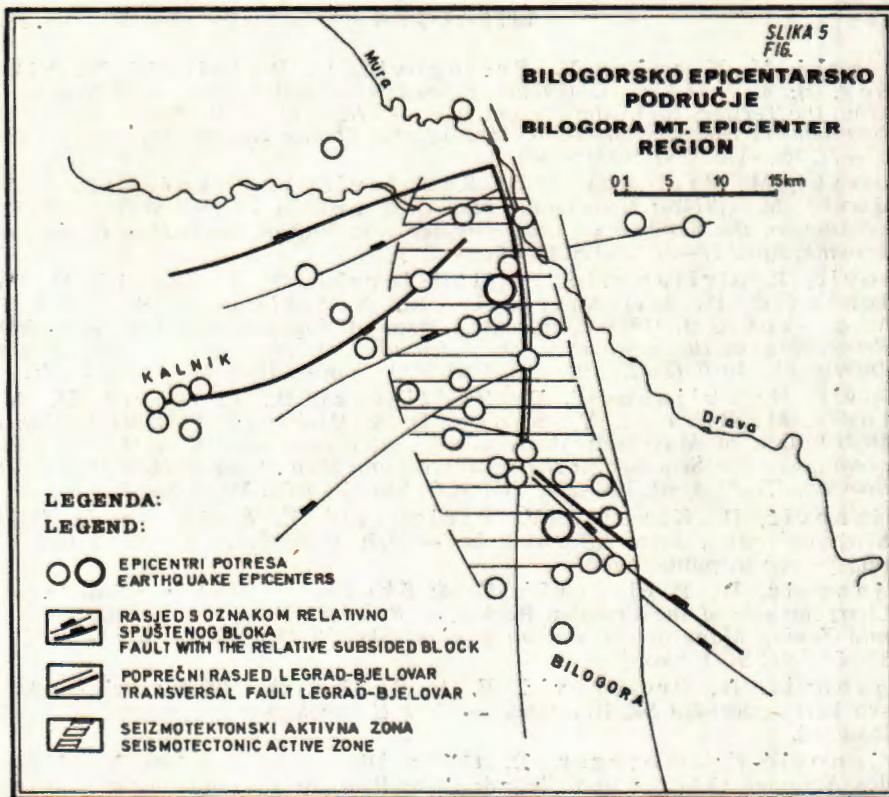
SLIKA 3
FIG.





i Bilogore. Paralelno brazde poprečni rasjedi koji odvajaju spomenute strukture. Situacija posve nalikuje na slične primjere u zonama tzv. transformiranih rasjeda (slika 5).

Usporedba geoloških i seizmoloških procesa u regionalnom smislu, ili podrobno po lokalitetima, doprinosi upoznavanju modela seizmotektonskih odnosa u pojedinim epicentralnim područjima. Iz podataka seizmičke i tektonske aktivnosti može se procijeniti iznos maksimalne magnitude potresa i razlučiti zona rasjeda u kojoj se očekuje žarište



takvog potresa. Tim postupkom odeđuje se dva od tri elementa potresa, i to mjesto i intenzitet potresa, dok se vrijeme nastanka potresa za sada ne može prognozirati. Dakle, pored seizmičke možemo izvršiti i seizmotektonsku rajonizaciju, čime se još realnije procjenjuje jakost seizmičkih sila na odabranoj lokaciji. (S k o k o te al., 1977). Na taj se način izrađuju karte u kojima su uneseni podaci o potresima mogućih magnituda i intenziteta.

ZAKLJUČAK

Seizmotektonska istraživanja pružila su nova saznanja o neotektonskom razvitku i današnjim geodinamičkim procesima u pojedinim predjelima Hrvatske. Najznačajniji zaključak odnosi se na potrebu zajedničkog izučavanja seizmoloških i geoloških procesa. Potvrđeno je da seizmološka istraživanja doprinose otkrivanju recentnih tektonskih pokreta. Neotektonski parametri dopunjuju seizmološke podatke i time unose elemente za procjenu, odnosno prognozu mjesta i jakosti budućih potresa. To je osnova za izradu seizmotektonske rajonizacije. Ovakva istraživanja primjenjuju se prilikom prostornog i urbanističkog planiranja, seizmičke mikrorajonizacije i aseizmičkog projektiranja i izgradnje.

LITERATURA

- Arsovski, M., Kranjec, V., Prelogović, E., Radulović, V., Sikošek, B. & Soklič, I. (1974a): Paleogeographical Evolution of Yugoslavia from the Tertiary up to the Present Day. — *UNESCO/UNDP, Proceedings of the Seminar on the seismotectonic Map of the Balkan Region, Dubrovnik, April 17—27*, 168—176, UNESCO, Skopje.
- Arsovski, M., Prelogović, E., Radulović, V., Sikošek, B. & Vidović, M. (1974b): Neotectonic Map of Yugoslavia. — *UNESCO/UNDP, Proceedings of the Seminar on the seismotectonic Map of the Balkan Region, Dubrovnik, April 17—27*, UNESCO, Skopje.
- Bašović, R., Cvijanović, D., Hadžievski, D., Janković, M., Milenković, D., Milosavljević, R., Nedeljković, S., Ribarić, V. & Skoko, D. (1974a): Epicentral Maps of Yugoslavia. — *UNESCO/UNDP, Proceedings of the Seminar on the Seismotectonic Map of the Balkan Region, Dubrovnik, April 17—27*, 190—195, UNESCO, Skopje. Ibid. Maps, No 45, 46.
- Bašović, R., Cvijanović, D., Hadžievski, D., Janković, M., Metović, M., Ribarić, V., Skoko, D. & Vučinić, S. (1974b): Map of Distribution of Maximum Macroseismic Intensities. — *UNESCO/UNDP, Proceedings of the Seminar on the seismotectonic Map of the Balkan Region, Dubrovnik, 17—27 April*, 196—204, UNESCO, Skopje. Ibid. Maps No. 46.
- Cvijanović, D., Kranjec, V., Prelogović, E. & Skoko, D. (1974): *Seizmotektonska karta SR Hrvatske*. — Arh. RGN fak. i Geofiz. zavoda, 88 pp., Zagreb (nepublicirano).
- Cvijanović, D., Prelogović, E. & Skoko, D. (1976a): Seismotectonic Characteristic of the Croatian Region. — *Proceedings of the Seminar on Seismic Zoning Maps of the Balkan Region*. Skopje, Oct. 27 — Nov. 4 1975, I, 52—68, UNESCO, Skopje.
- Cvijanović, D., Prelogović, E. & Skoko, D. (1976b): *Seizmotektonska karta područja SR Hrvatske* — *Acta Seismologica Iugoslavica*, 4, 19—23, Beograd.
- Gorjanović-Kramberger, D. (1907): Die geotektonischen Verhältnisse des Agramer Gebirges und die mit demselben im Zusammenhang stehenden Erscheinungen. — *Anhang z. d. Abhand. preuss. Akad. Wiss*, 1—30, Berlin.
- Kišpatić, M. (1891—1906): Potresi u Hrvatskoj. — *Rad JAZU*, 1—94, Zagreb. Ibid. Potresna izvješća 1883—1906.
- Kranjec, V. & Prelogović, E. (1974): O paleogeografskim i neotektonskim odnosima u tercijaru i kvartaru na teritoriju SR Hrvatske. — *Geol. vjesnik*, 27, 95—112, Zagreb.
- Mohorovičić, A. (1906): Godišnje izvješće zagrebačkog meteorološkog observatorija za god. 1906. — Arh. Geofiz. zavoda, Zagreb.
- Mokrović, J. (1950): Potresi u Zagrebu. — Arh. Geofiz. zavoda, II, 13, Zagreb.
- Prelogović, E. (1975): Neotektonska karta SR Hrvatske. — *Geol. vjesnik*, 28, 97—108, Zagreb.
- Prelogović, E. & Cvijanović, D. (1976a): Vertikalni neotektonski pokreti i pojave jačih potresa na području SR Hrvatske. — *Geol. vjesnik*, 29, 151—157, Zagreb.
- Prelogović, E. & Cvijanović, D. (1976b): Kvartarne deformacije i seizmogene zone Hrvatske. — 8. Jug. geol. kongres, Bled, 1—5. oktobar 1974, 3, 175—190, Ljubljana.
- Ritsema, A. R. (1974): The Earthquake Mechanisms of the Balkan Region. — *Survey of the seismicity of the Balkan Region, UNDP Project REM/70/172*, 1—36, UNESCO, Skopje.
- Skoko, D., Arsovski, M. & Hadžievski, D. (1976): Determination of Possible Earthquake Origin Zones on the Territory of Yugoslavia. — *Proceedings of the Seminar on seismic Zoning Maps*, Oct. 27 — Nov. 4 1975, I, 116—131, UNESCO, Skopje.

- Skoko, D., Cvijanović, D., Prelogović, E., Kranjec, V., Hernitz, Z., Sokač, A., Velić, J. & Kanajet, B. (1977): *Definiranje projektnih parametara učinka potresa na lokaciji nuklearne elektrane Prevlaka*. — Fond struč. dok. »Elektroprivreda«, Zagreb (nepublicirano).
- UNDP/UNESCO (1974): Survey of the seismicity of the Balkan Region. — *Catalogue of Earthquakes*, I: 1901—1970, II: prior to 1901, 1—540, UNESCO, Skopje.
- UNDP/UNESCO (1914a): Survey of the seismicity of the Balkan Region. — *Catalogue of Earthquakes*. — Part III, Atlas of isoseismal Maps, 1—280, UNESCO, Skopje.

The effect between neotectonic movements and seismic activities in Croatia

E. Prelogović, D. Cvijanović i D. Skoko

During the past few years intensive seismotectonic research has been taking place in Croatia. Account has been given to the possibility of locating recent tectonic movements and of neotectonic parameters in the evaluation of seismic activity. Firstly, neotectonic research is shown. Plate 1 shows neotectonic regions. The use of neotectonic indicators in seismology is encountered in the calculation of possible maximum magnitudes of earthquakes. For that reason the maximum magnitude M of an earthquake is expressed as the cubed function of the sum S quota φ_1 of geological elements. Plate 2 shows the map of maximum possible magnitudes of earthquakes in respect to geological data; maximum magnitudes established so far are also shown. Movements which cause earthquakes in Croatia do not exceed the tenth degree (X) in the MCS scale. It is possible to follow seismic time variations (Text fig. 1) and the level of seismic activity in certain epicentral regions (Text fig. 2). In today's phase of research it is important to establish the mechanism of movements in the focus of the earthquakes (Plate 3) and to model seismotectonic active regions (Text figs. 3 & 4). Most earthquakes originate in regional fault belts, in their intersections, and also in the bordering tracts of tectonic units or various directions along transform faults.

TABLA — PLATE I

KARTA NEOTEKTONSKE RAJONIZACIJE
MAP OF NEOTECTONIC REGIONS

Legenda:

1 — područje diferenciranih pokreta u Panonskom bazenu; 2 — predjeli s amplitudama spuštanja većima od -3000 m; 3 — područje najvećeg neotektonskog izdizanja; 4 — blokovi izdignuti iznad 1000 m; — 5 Jadranski bazen; 6 — jadranske depresije s amplitudama spuštanja većima od -3000 m.

Ia — južna rubna zona Panonskog bazena; Ib — zona diferenciranih pokreta u Panonskom bazenu; Ic — medvedničko-kalničke strukture; Id Murska potolina; II — područje najvećeg neotektonskog izdizanja; IIa — prijelazna zona između Panonskog bazena i područja najvećeg neotektonskog izdizanja; IIb — prijelazna zona između Jadranskog bazena i Dinarida; III — Jadranski bazen.

Legend:

1 — Area of differentiated movements in the Pannonian basin; 2 — Areas with subsidence amplitudes greater than -3000 m; 3 — Area of the highest neotectonic uplifts; 4 — blocks uplifted over 1000 m; 5 — Adriatic basin; 6 — Adriatic depression with subsidence amplitudes greater than -3000 m.

Ia — The southern bordering zone of the Pannonian basin; Ib — Regions of differentiated movements in the Pannonian basin; Ic — Structures of the mt. Medvednica and mt. Kalnik type; Id — The River Mura depression; II — Area of the highest neotectonic uplifts; IIa — transition zone between the Pannonian basin and areas of the highest neotectonic uplifts; IIb — transition zone between the Adriatic basin and the Dinarides; III — Adriatic basin.

