

Odnos volumen-gustoća i elastička svojstva efuziva i ksenolita armenskog vulkanskog visočja u uvjetima visokih termobara

Albert Juhanjan*

Politehnički institut, Laboratorij geodetskih mjerenja i eksperimentalne seizmotehtonike, Erevan, Armenska SSR.

Primljeno 1. travnja 1987, u konačnom obliku 10. listopada 1987.

Kompleksno eksperimentalno istraživanje elastičkih svojstava i gustoće vulkanita, efuziva i njihovih ksenolita na području Armenskog vulkanskog visočja omogućilo je upoznavanje promjena fizičkih karakteristika vulkanskih stijena ovisno o dubini. Eksperimentalno je ocijenjeno da se veličine termoeleastičkih napetosti u donjim slojevima Zemljine kore umanjuju povećanjem dubine.

Volume-density ratio and elastic properties of Armenian volcanic highland effusives and xenoliths in high thermobaric conditions

Complex experimental research of elastic properties and density of volcanics, effusives and their xenoliths in Armenian volcanic highland provided main characteristics of vertical changes in physical properties of volcanic rock in tectonic mobile structures. The experiments point to a decrease of thermoelastic stress values in lower layers of the Earth's crust.

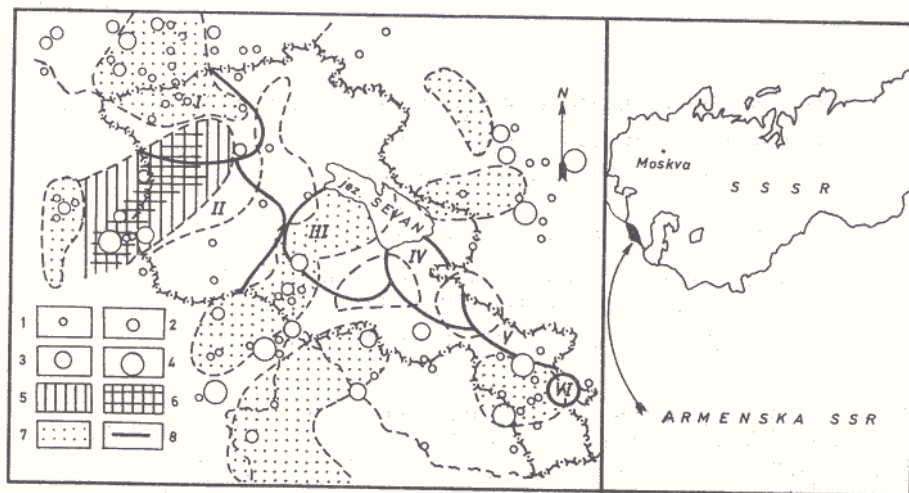
1. Uvod

Proučavanje odnosa volumena-gustoće i elastičkih karakteristika dubinskih i efuzivnih stijena nužno je za interpretaciju seizmoloških i gravimetrijskih podataka i za procjenu mogućih napetosti u slojevima tektonski aktivnih struktura. Ta su istraživanja posebno važna za izradu regionalnih petrofizičkih modela Zemljine kore i gornjeg plašta. Jedan od osnovnih izvora naših spoznaja o sastavu spomenutih dubinskih zona Zemlje su ksenoliti u raznovrsnim vulkanitima i sami vulkaniti, koji su zapravo diferencijati dubljih slojeva Zemljine kore te sadrže informaciju o termodinamičkom stanju litosfere (Genšaft i dr., 1978).

Ovako povoljan sastav stijena koji pogoduje navedenom istraživanju, ima sjeveroistočni dio Armenskog vulkanskog visočja (Armenska SSR u SSSR). U sadašnjoj

* Na specijalizaciji u Geofizičkom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u vremenu od 12.12.1986. do 12.10.1987.

strukturni teritorija Armenije izdvaja se široko neovulkansko područje kao dio Armeniskog vulkanskog visočja u dužini oko 300 km, koje obuhvaća šest vulkanskih podzona. Raspored tih vulkanskih podzona prikazuje slika 1.



Slika 1. Karta epicentara potresa s $M > 4,5$ za historijski period (prema: Nazaretjan, 1984) i neovulkanske podzone na području Armenije (prema: Širinjan, 1980). Epicentri potresa s magnitudom: 1) 4,5–5,0; 2) 5,1–5,5; 3) 5,6–6,0; 4) 6,1–6,7; 5) zone seizmičkog zatišja, 6) najvjerojatnije zone nastajanja jačih potresa, 7) aktivna zona po podacima epicentara potresa sa $K \geq 9$ za vrijeme 1962–1980. godine, 8) granica vulkanskih podzona. Vulkanska podzona: I. Kečutska, II. Aragatska, III. Gegamska, IV. Ajodzor-Vardeniska, V. Sjunkska, VI. Kavanska.

Figure 1. Map of earthquake epicentres ($M > 4.5$) for the historical period (after Nazaretjan, 1984) and neovolcanic subzones on the Armenian territory (after Širinjan, 1980). Earthquake epicentres with the magnitude: 1) 4.5–5.0; 2) 5.1–5.5; 3) 5.6–6.0; 4) 6.1–6.7; 5) zones of seismic quiescence, 6) most probable zones of strong earthquakes occurrence, 7) active zone, inferred according to epicentres of earthquakes with $K \geq 9$ in the period 1962–1980, 8) the boundary of volcanic subzones. Volcanic subzone: I. Kechut, II. Ararat, III. Gegam, IV. Ajodzor-Vardenis, V. Sjunks, VI. Kafan.

Vulkanske podzone tvore zapadnu (I. i II. na slici 1) i istočnu vulkansku zonu (III. i IV). One se razlikuju prema vrsti magmatskih formacija nastalih u doba pliocen-kvaratar (Širinjan, 1981). U jugoistočnom dijelu područja (Kavanska podzona) na površini se nalaze stijene starije od kenozoika. Upravo tu su najpotpunije razvijene i osnovne neovulkanske stijene: olivin-bazalti i hornblend-bazalti. Sa stanovišta petrokemije, spomenute stijene slične su stijenama unutrašnjo-kontinentalnih olivin-bazaltnih formacija, koje su nastale kao posljedica djelomičnog taljenja gornjeg plašta (Belousov i dr., 1982). Za ostale vulkanske podzone (Širinjan, 1980) karakteristični su efuzivi bazaltne, andezit-bazaltne i andezit-dacitne formacije.

Vulkanske podzone razlikuju se po intenzitetu vulkanizma i po tipu magmatske formacije. Međutim, u svim podzonama ističe se apsolutna odsutnost minerala i stijena između ksenogenih minerala dubinskih ksenolita u vulkanitima, koji postoje u uvjetima gornjeg plašta (npr. špinelski i granatni lercoliti, prema Genšaftu i dr., 1985). U spomenutim radovima utvrđeno je da ksenogeni materijal u magmatskih stijenama karakteri-

zira supstrat u kojemu su smještene magmatska žarišta. Polazeći od takvih tumačenja dolazi se do zaključka da se magmatska žarišta raspoređuju upravo u vulkanskim podzonama razmatranog područja. Takav raspored žarišta odraz je visoke termodinamičke aktivnosti Zemljine kore promatranog područja kao posljedice aktivnosti gornjeg plašta.

U razdoblju 1979-1983. godine organizirano je sistematsko uzimanje uzoraka kasnokenozojskih stijena u području navedenih vulkanskih podzona. Iz tog skupa, od 500 uzoraka odabrano je nekoliko desetaka najtipičnijih i podvrgnuto ispitivanju u uvjetima visokog tlaka i temperature (visoke P - T vrijednosti).

2. Aparatura i metodika istraživanja

Tijekom složenog proučavanja fizikalnih svojstava ksenolita i efuziva izvršena su ova mjerenja:

1. Brzine širenja valova v_p pri tlaku od 15 kbara.

Mjerenja su izvršena uređajem visokog tlaka tipa "cilindar-klip" impulsnom ultrazvučnom metodom (detaljan opis u: Volarič i dr., 1974). Za mjerenja su poslužili cilindrični uzorci stijena dijametra 17,5 mm i duljine 20 mm.

2. Mjerenje volumnih karakteristika i gustoće pri tlaku $P = 12$ kbar i temperaturi $T = 20$ do 250 °C. Mjerenja su izvršena uređajem tipa "klipni piezometar" na cilindričnim uzorcima dijametra 8 mm i duljine 10 mm. Uređaj i metoda računanja svojstava materije u uvjetima visokih P - T vrijednosti opisani su u radu Genšaft i dr., 1962.

Kao sredstvo koje prenosi tlak u oba uređaja upotrijebljeno je olovo. Početna gustoća uzorka mogla je biti određena na dva načina: hidrostatičkim vaganjem ili dijeljenjem težine cilindričnog uzorka s volumenom.

U okviru ovog istraživanja izvršena je detaljna petrografska-mineraloška analiza uzoraka u uvjetima visokih P - T i određen je njihov kemijski sastav. Na temelju tih podataka uzorci stijena su svrstani u tzv. petrografske grupe.

3. Valne brzine v_p u uvjetima visokog tlaka efuziva

Za proučavanje efuzivnih stijena pod visokim tlakom ispitana su najmanje dva uzorka iz svake petrografske grupe. Fizikalno-petrografske karakteristike i brojčane vrijednosti valnih brzina v_p za širenje kroz efuzivne stijene, ispitane do tlaka $P = 15$ kbar, navedene su u tablici 1.

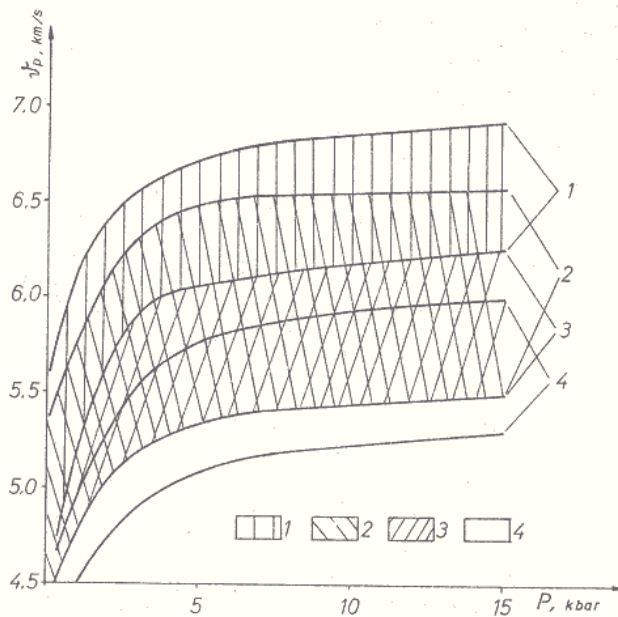
Velike vrijednosti brzine u uvjetima visokog tlaka imaju bazalti, a skup krivulja za andezitno-dacitski sustav zauzima donji dio mjernog područja (slika 2). U cijelom intervalu tlaka, najveću promjenljivost valne brzine v_p imaju valovi pri prolazu kroz andezit-sko-bazaltne stijene andezitske formacije, koje su pokrivene poljem bazalta, a odozdo ulaze u područje dacita. Vrijednosti brzine variraju u intervalu 6,26 do 6,94 km/s za bazalt, 5,38 do 6,62 km/s za stijene andezitskog i andezitsko-bazaltnog sastava te u intervalu 5,18 do 5,96 km/s za dacite.

Kako pokazuju tablica 1 i slika 2, valne brzine širenja kroz stijene svih proučenih kemijskih sastava teže s porastom tlaka prema sve većim vrijednostima, neovisno o početnoj vrijednosti brzine.

Tablica 1. Fizikalno-petrografske karakteristike vulkanita (prema Juhanjan, 1985).

Table 1. Physical-petrographic characteristics of volcanics (after Juhanjan, 1985)

Broj uzoraka	Poroznost %	Gustoća, kg x m ⁻³	Stijena	Zastupanost utrusaka i osnovne mase u volumenu stijene	Brzina valova (km/s) pod tlakom (kbar)			
					0,001	5	10	15
4/78	2,9	2860	dolerit bazalt	— " —	5,50	6,71	6,82	6,94
2/78	2,9	2850	"	— " —	5,01	6,68	6,79	6,85
2A/79	3,1	2750	bazalt	20 ut, 80 om (85 miK, 15 st)	5,43	6,68	6,79	6,85
34B/79	3,4	2680	hialobazalt	20 ut, 80 om (75 miK, 25 st)	4,40	6,02	6,18	6,26
21/79	—	—	andezito-bazalt	10 ut, 90 om (10 miK, 90 st)	5,65	6,06	6,10	6,11
44A/78	—	2720	"	25 ut, 75 om (85 miK, 15 st)	5,51	6,50	6,58	6,62
20/79	—	2670	"	30 ut, 70 om (75 miK, 25 st)	5,03	6,40	6,48	6,52
39/78	—	2660	"	20 ut, 80 om (65 miK, 35 st)	4,8	5,71	5,92	6,05
5/79	—	2640	"	25 ut, 75 om (85 miK, 15 st)	4,5	5,82	6,01	6,12
36/78	4,8	2570	"	25 ut, 75 om (70 miK, 30 st)	4,84	6,32	6,39	6,42
42/78	3,5	2680	andezit	10 ut, 90 om (40 miK, 60 st)	4,50	6,00	6,15	6,25
29/78	3,3	2650	"	50 ut, 50 om (60 miK, 40 st)	4,44	5,92	6,01	6,18
27/78	—	2640	"	— 100 om (65 miK, 35 st)	4,32	5,18	6,34	6,48
38/78	6,7	2540	"	30 ut, 70 om (75 miK, 25 st)	4,42	5,89	5,98	6,08
33/78	—	2530	hialoandezit	— 100 om (40 miK, 60 st)	4,20	5,20	5,30	5,38
28/78	—	2320	"	10 ut, 90 om (45 miK, 85 st)	4,40	6,75	5,88	5,94
43/78	12,8	2670	andezito-dacit	20 ut, 70 om (85 miK, 15 st)	4,38	5,73	5,89	5,6
2/79	—	2530	"	15 ut, 85 om (70 miK, 30 st)	4,01	5,50	5,60	5,65
1A/78	—	2420	"	25 ut, 75 om (80 miK, 20 st)	3,84	4,95	5,10	5,18
40/78	—	—	hialodacit	10 ut, 90 om (15 miK, 85 st)	5,14	5,42	5,45	5,46



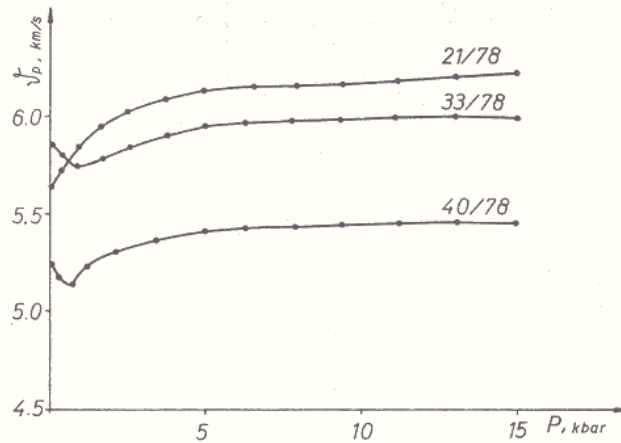
Slika 2. Ovisnost valne brzine v_p o tlaku pri širenju kroz eruptivne stijene.
1. stijena bazaltnog sastava, 2. stijena andezitno-bazaltnog sastava, 3. stijena andezitskog sastava, 4. stijena dacitskog sastava

Figure 2. Dependence of the wave velocity v_p in igneous rocks on the pressure.
1. Rock of basaltic composition, 2. Rock of andesitic-basaltic composition, 3. Rock of andesitic composition, 4. Rock of dacitic composition.

U drugu ruku, dolazi do izražaja ovisnost između početne gustoće stijena pod visokim tlakom i valne brzine (tablica 1). Višoj početnoj gustoći uzorka odgovara veća vrijednost valne brzine v_p ; pokazalo se da to vrijedi gotovo za sve ovdje istražene uzorke.

Ti se rezultati slažu s ranije objavljenim rezultatima o istraživanju vulkanita u Armeniji (Širinjan, 1980).

Za ispitivanje ovisnosti valne brzine v_p o agregatnom stanju stijena (stupanj kristaliziranosti) upotrijebljena su tri uzorka staklenih efuziva: hialobazalt, hialoandezit i hialodacit. Krivulje promjene valne brzine prikazuje slika 3. Ovisnost valne brzine v_p o



Slika 3. Ovisnost valne brzine v_p o tlaku u staklovitim stijinama: 21/78-hialobazalt, 33/78-hialoandezit, 40/78-hialodacit

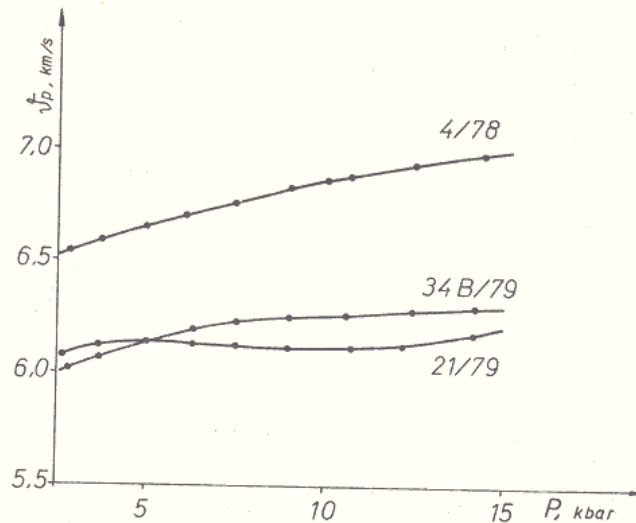
Figure 3. Dependence of the wave velocity v_p in glassy rocks on the pressure. 21/78 - hyalobasalt, 33/78 - hyaloandesite, 40/78 - hyalodacite

Tablica 2. *Kemijski sastav vulkanita (prema Juhanjan, 1985). Sve željezo određeno je u obliku Fe_2O_3*
 Table 2. *Chemical composition of volcanics (after Juhanjan, 1985). All iron determined in the form of Fe_2O_3 .*

Stijena	Broj uzoraka	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	$Fe_2O_3^*$	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	H_2O	P.p.	Y
bazalt	4/78	48,93	1,76	17,40	11,36	6,72	7,53	3,43	0,87	-	2,0	99,99
	348/79	48,76	1,89	18,06	9,40	5,79	9,17	3,01	4,8	-	1,84	99,74
	2/78	50,87	1,0	17,35	11,72	7,56	8,27	2,62	0,5	-	0,1	99,99
	24/79	51,66	0,95	19,57	7,6	6,15	8,23	3,93	1,57	-	0,33	99,99
andezito-bazalt	44A/78	52,97	1,23	20,72	8,20	4,58	6,68	4,00	1,87	-	0,2	100,4
	44B/78	55,82	1,05	17,85	7,0	4,83	6,80	3,75	2,0	-	0,84	99,94
	20/79	56,65	1,35	17,42	7,25	3,71	5,88	4,50	3,25	-	0,44	100,15
	39/78	57,21	0,97	15,54	8,25	4,33	6,76	4,62	2,5	0,14	0,48	100,66
	5/79	57,99	0,9	16,42	6,67	4,77	6,99	3,3	2,65	-	0,06	99,95
36/78	57,80	0,70	13,5	9,0	4,6	7,14	4,31	2,31	0,08	0,18	99,54	
andezit	38/78	58,06	1,0	15,01	8,75	2,98	8,64	4,0	2,12	11,00	H.06	100,56
	28/78	58,22	0,72	14,52	7,00	4,6	6,01	4,75	2,68	0,14	0,94	99,98
	33/78	58,33	0,8	15,91	8,98	5,88	6,01	2,88	1,62	-	2,29	100,7
	42/78	58,95	0,66	16,53	6,62	2,98	6,01	4,43	2,63	0,04	0,98	99,88
	29/78	59,35	0,62	16,66	6,2	4,95	6,61	2,88	1,75	-	0,75	99,77
	27/78	59,49	0,65	16,93	6,63	4,76	6,21	2,5	1,5	-	0,81	99,48
	andezito-dacit	43/78	60,72	0,50	16,49	6,25	2,71	6,01	4,68	2,68	0,06	0,21
2/79	60,92	1,4	18,37	6,4	1,85	4,4	4,3	0,7	-	1,41	99,75	
14/79	62,67	0,9	15,53	6,75	1,85	5,15	3,5	2,6	-	0,64	99,59	
40/78	64,98	0,56	15,24	4,62	2,16	3,76	0,75	3,25	0,20	0,38	100,65	

količini stakla u vulkanskoj stijeni složenija je nego takva ovisnost valne brzine u jače kristaliziranoj vulkanskoj stijeni. Različito povećavanje elastičnosti i gustoće kristala i stakla pri porastu tlaka može uzrokovati formiranje većeg broja mikropukotina. Porast tih pukotina najizrazitiji je na mjestima koncentrirane napetosti, praćene istovremeno

strukturnim nejednakostima. Tu dolaze do izražaja dva procesa: porast pukotina pod utjecajem napetosti i smanjenje tih napetosti zbog njihova opuštanja. Ta kompenzacija je slabo izražena zbog razlika u fizikalnim svojstvima na granici kristal-staklo. S tim u vezi ističu se krivulje promjene valne brzine v_p za hialoandezite i hialodacite (33/78 i 40/78 na slici 3). Pod tlakom 2,5 kbar počinje djelomično urušavanje u stijeni. Stoga se pri tlaku oko 2,5 kbar smanjuje valna brzina, a ne povećava se. Pri daljnjem povećanju tlaka valna brzina ostaje gotovo stalna s neznatnim iznosom promjene ($\partial v_p / \partial P = 0,016 \text{ km/s} \cdot \text{kbar}$).



Slika 4. Promjena valne brzine v_p s tlakom ovisno o strukturi bazaltoida: 34B/79—bazalt s hiapilitnom strukturom osnovne mase, 21/79—bazalt s hialinskom strukturom osnovne mase, 4/78—bazalt s doleritskom strukturom

Figure 4. The change of wave velocity v_p with pressure depending on the structure of basaltoids: 34B/79—basalt with hyaphylitic basic structure, 21/79—basalt with hyaline basic structure, 4/78 - basalt with doleritic structure.

Radi ispitivanja djelovanja strukturnih osobina na karakter promjena brzine v_p pod visokim tlakom istraženi su bazalti, koji su međutim slični po svojstvu opće poroznosti, a razlikuju se po strukturi. Slika 4 prikazuje krivulje promjene valne brzine s tlakom u doleritskom, hialopilitskom i hialinskom bazaltu. Te krivulje jasno pokazuju da se u intervalu vrijednosti tlaka 2,5 do 15 kbar bazalti različitih struktura odlikuju različitim gradijentima valne brzine v_p . U tom se intervalu tlaka gradijenti valne brzine $\partial v_p / \partial P$ povećavaju uz povećanje količine kristaliziranih zrna i uz povećanje stupnja osnovne mase stijena u intervalu tlaka 2,5 do 15 kbar. Najveći gradijent ima dolerit-bazalt i iznosi $-0,024 \text{ km/s} \cdot \text{kbar}$.

Prema opisanim rezultatima, karakter promjene valne brzine v_p u vulkanskim stijenama određen je uglavnom strukturnim osobinama tih stijena. To se tumači utjecajem veličine dodirnih površina mineralnih zrna i jakošću strukturnih veza između mineralnih čestica, koje ulaze u sastav stijena. Prema tome, brzina širenja valova u stijenama vulkanskog porijekla i karakter njene promjene ovisi o stupnju kristaliziranosti i agregatnom stanju stijena. Stijene koje imaju jače razvijenu kristaliziranu strukturu imaju i veće vrijednosti valne brzine nego efuzivi istog sustava, ali manje kristalizirane strukture.

4. Volumen i gustoća ksenolita u uvjetima visokih P - T

Tablica 3 sadrži neke od mineraloško-petrografskih karakteristika uzoraka. Vidi se da većina istraženih uzoraka potječe od tipično intruzivnog formiranja Zemljine kore sa sporednim procesima amfibolizacije i biotizacije.

Tablica 3. Mineraloško-petrografske karakteristike ksenolita.

Pl — plagioklaz, Cpx — klinopiroksen, Opx — ortopiroksen, Amph — amfibol, Ol — olivin, Hbd — hornblend, Bi — biotit, Gl — staklo, Ap — apatit, Mt — magnetit, Tm — titanomagnetit (prema: A. K. Juhanjani i Ju. S. Genšaft, 1983)

Table 3. Mineralogical-petrographic characteristics of xenoliths.

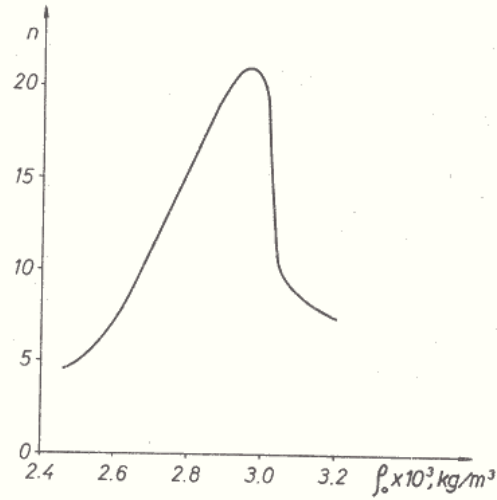
Remarks: Pl — plagioclase, Cpx — clinopyroxene, Opx — orthopyroxene, Amph — amphybole, Ol — olivine, Hbd — hornblende, Bi — biotite, Gl — glass, Ap — apatite, Mt — magnetite, Tm — titanomagnetite (after Juhanjani and Genšaft, 1983).

Broj uzoraka	Stijena	Relativni mineraloški sastav	Promatrane osobine stijene i strukture
28 - 80	Piroksenit	$Opx < Cpx > Ol \Rightarrow Amph$	Amfibolizacija
28 - 80	Piroksenit	$Opx \ll Cpx > Ol \Rightarrow Amph$	
132- 18	Klinopiroksenit	$Cpx \Rightarrow Opx \geq Ol > Pl$	
20 - 80	Vebsterit	$Cox \geq Opx \Rightarrow Amph > Gl$	Razdrobljenost i rastresitost stijene
43 - 78	Gabro	$Pl \geq Cpx > Opx > (Ap+Mt) > Gl$	
69 - 80	Amfibolit, gabro-norit	$Pl \geq Cpx > Opx > Amph > T_M$	Amfibolizacija
43 - 78	Hornblendit	$Hbd \geq Px > Mt$	
43 - 78	Gabro	$Pl \geq Cpx > Opx > Amph > T_M$	
66 - 80	Amfiboliski gabro	$Pl \geq Cpx > Amph \Rightarrow (T_M + Ap)$	Amfibolizacija
60-02-1	Gabro	$Pl \geq Cpx \Rightarrow T_M$	
60 - 3	Gabro granulit	$Cpx \geq Opx > Pl \geq Amph \Rightarrow T_M$	Prekristalizacija amfibola
60 - 1	Amfibolit	$Cpx \geq Pl \geq Amph > Bl \Rightarrow (T_M + Ap)$	Biotitizacija
60 - 13	Gabro	$Pl \geq Cpx \geq T_M$	
127- 2	Amfibolit	$Pl \geq Cpx \geq Amph \Rightarrow T_M + Gl$	Jako pretaljivanje
127- 4	Gabro	$Pl \geq Amph \geq Cpx \geq T_M$	Amfibolizacija
132- 13	Gabro granulit	$Cpx \geq Pl \Rightarrow (T_M + Gl)$	Tragovi taljenja
43 - 78	Gabro norit	$Pl \geq Opx \geq Cpx > Ol > (Ap + Mt)$	
21 - 78	Gabro	$Pl \geq Px \geq M \geq Gl$	Porozna, tragovi taljenja
132- 17	Amfibolit	$Pl \geq Cpx \geq Opx > Amph (T_M + Gl)$	Jako pretaljivanje

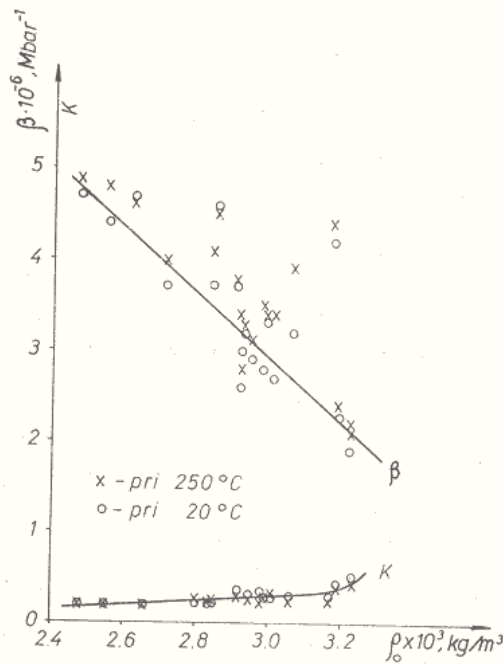
Proučavanje početne gustoće vulkanskih stijena pokazuje da je za većinu ksenolita karakteristična gustoća "bazaltnog" sloja Zemljine kore. Za ksenolitne stijene je karakteristično unimodalno raspoređivanje čestina gustoće stijena (slika 5), što govori o vjerojatno jedinstvenom dubinskom izvoru ksenolita u kojemu se nailazi na smještaj magmatskih žarišta unutar Zemljine kore.

Iz ovisnosti opadanja volumena V o tlaku proizlazi sažimanje volumena uz povećanje početne gustoće ksenolita. To se zorno vidi na slici 6 na kojoj je prikazana ovisnost srednjeg koeficijenta volumnog sažimanja β o tlaku, koji se mijenja od 6 do 12 kbara. U tom intervalu tlaka ovisnost $\Delta V/V_0$ o tlaku bliza je linearnoj, ali ne potpuno. Sadržaj stakla u ksenolitu umanjuje njegovu početnu gustoću i povećava $\Delta V/V_0$ (npr. uzorak 20-80 u tablici 4). Podaci o promjeni volumnog sažimanja $\Delta V/V_0$ s tlakom kod dviju vrijednosti temperature (20 °C i 250 °C) navedeni su u tablici 4. Tablica 5 sadrži vrijednosti izotermičkog koeficijenta volumnog sažimanja ksenolita. Prema tim podacima određena je ovisnost termičkog koeficijenta volumne ekspanzije $\partial\alpha/\partial P$ o tlaku u temperaturnom intervalu 20 do 250 °C. Vrijednost veličine $\partial\alpha/\partial P$ nalazi se u intervalu 0,6 do $2,6 \cdot 10^{-6}$ $\text{stup}^{-1} \text{ kbar}^{-1}$. Takav rezultat znači da se povećanjem tlaka odnosno dubine vrijednosti termoelastičkih napetosti u unutrašnjosti Zemlje smanjuju. Istovremeno, u stabilnijim

uvjetima s relativno niskim geotermičkim gradijentima, smanjivanje termoelastičkih napetosti mora biti više izraženo nego u tektonski aktivnim uvjetima s većim endogen-skim režimom dubinskih zona.



Slika 5. Histogram raspoređivanja početne gustoće ksenolita
Figure 5. Histogram of initial distribution of xenolith density.



Slika 6. Ovisnost srednjih koeficijenata volumnog sažimanja i modula stlačivosti (K) o početnoj gustoći ksenolita u intervalu tlaka 6-12 kbar pri temperaturi 20 °C i 250 °C
Figure 6. Dependence of mean coefficients of volume compression and compressibility modulus (K) on the initial xenolith density in the pressure interval 6-12 kbar and temperatures of 20 °C and 250 °C.

Tablica 4. Relativni dekrementi volumena (V/V_0) ksenolita pri temperaturi 20°C i 250°C u intervalu tlaka 2–12 kbar (prema: Juharjan i Genšaft, 1983).

Table 4. Relative xenolith volume decrements (V/V_0) at temperatures of 20°C and 250°C in the pressure interval of 2–12 kbar (after Juharjan and Genšaft, 1983).

Broj uzoreka	Gustoća kg·m ⁻³	$\frac{\Delta V}{V_0}$ (pri 20°C)					$\frac{\Delta V}{V_0}$ (pri 250°C)				
		4 kbar	6	8	10	12	4 kbar	6	8	10	12
28 - 80	3220	0,0048	0,0083	0,0120	0,0159	0,0196	0,0049	0,0088	0,0128	0,0171	0,0218
28 - 80	3220	0,0047	0,0085	0,0124	0,0162	0,0198	0,0052	0,0089	0,0132	0,0175	0,0216
132- 18	3190	0,0053	0,0101	0,0144	0,0191	0,0238	0,0056	0,0110	0,0161	0,0206	0,0258
20 - 80	3170	0,0102	0,0180	0,0265	0,0349	0,0431	0,0107	0,0196	0,0273	0,0366	0,0457
43 - 78	3060	0,0077	0,0146	0,0213	0,0274	0,0335	0,0084	0,0162	0,0253	0,0317	0,0396
69 - 80	3010	0,0079	0,0152	0,0221	0,0288	0,0344	0,0085	0,0173	0,0265	0,0325	0,0376
43 - 78	2990	0,0082	0,0163	0,0229	0,0295	0,0360	0,0069	0,0169	0,0256	0,0303	0,0375
43 - 78	2980	0,0085	0,0145	0,0216	0,0289	0,0351	0,0091	0,0177	0,0244	0,0316	0,0308
66 - 80	2950	0,0067	0,0130	0,0191	0,0242	0,0301	0,0071	0,0139	0,0205	0,0261	0,0323
60-02-1	2930	0,0062	0,0125	0,0189	0,0250	0,0317	0,0067	0,0137	0,0206	0,0278	0,0334
60 - 3	2920	0,0054	0,0099	0,0150	0,0203	0,0252	0,0055	0,0103	0,0159	0,0213	0,0268
60 - 1	2920	0,0063	0,0120	0,0181	0,0246	0,0302	0,0068	0,0134	0,0204	0,0270	0,0338
60 - 13	2910	0,0090	0,0165	0,0239	0,0314	0,0391	0,0093	0,0174	0,0242	0,0321	0,0399
127- 2	2850	0,0104	0,0200	0,0291	0,0374	0,0479	0,0115	0,0229	0,0315	0,0401	0,0498
127- 4	2840	0,0092	0,0173	0,0251	0,0324	0,0396	0,0098	0,0185	0,0271	0,0356	0,0429
132- 13	2710	0,0112	0,0198	0,0279	0,0356	0,0420	0,0209	0,0209	0,0286	0,0377	0,0443
43 - 78	2620	0,0129	0,0222	0,0318	0,0413	0,0505	0,0133	0,0227	0,0321	0,0413	0,0501
21 - 78	2550	0,0109	0,0199	0,0282	0,0377	0,0462	0,0119	0,0209	0,0309	0,0401	0,0498
132- 17	2470	0,0127	0,0231	0,0322	0,0415	0,0512	0,0154	0,0273	0,0374	0,0477	0,0566

Tablica 5. Srednji koeficijenti volumnog stezanja (β), modul volumnog stezanja ($K = 1/\beta$) u intervalu 6–12 kbar i promjena termičkog koeficijenta volumnog rastezanja s tlakom ($\partial\alpha/\partial P$) uzoraka ksenolita (prema Juharjan i Genšaft, 1983).

ut - utrusci, om - osnovna masa, mik - mikroliti, st - staklo

Table 5. Mean coefficients of volume compression (β) and the compressibility modulus ($K = 1/\beta$) in the interval 6–12 kbar, and the change of thermal volume dilatation coefficient with pressure ($\partial\alpha/\partial P$) determined for the xenolith samples (after Juharjan and Genšaft, 1983).

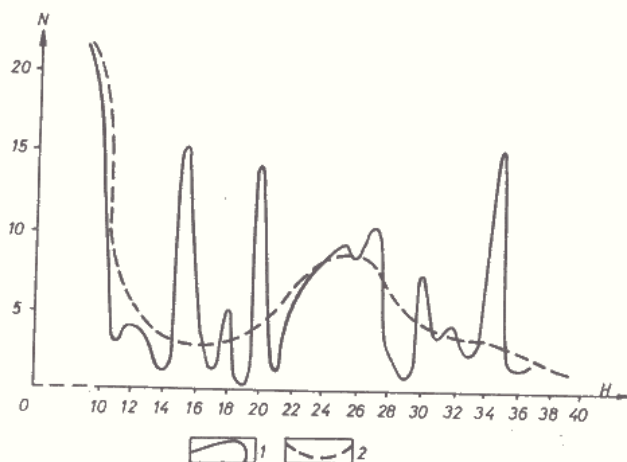
ut - inclusions, om - basic mass, mik - mikrolites, st - glass

Broj uzoraka	$(\frac{\partial\alpha}{\partial P}) \times 10^{-6}$ stup ⁻¹ x kbar ⁻¹	pri 20°C		pri 250°C	
		$\beta_{6-12} = (\frac{\Delta V}{V_0 \Delta P}) \times 10^{-6}$ Mbar ⁻¹	$K = \frac{1}{\beta}$	$\beta_{6-12} = (\frac{\Delta V}{V_0 \Delta P}) \times 10^{-6}$ Mbar ⁻¹	$K = \frac{1}{\beta}$
28 - 80	0,8	1,9	0,52	2,2	0,45
28 - 80	0,7	1,9	0,52	2,1	0,47
132- 18	0,7	2,3	0,43	2,5	0,4
20 - 80	1,1	4,2	0,24	4,4	0,23
43 - 78	2,6	3,2	0,31	3,9	0,25
69 - 80	1,4	2,7	0,37	3,4	0,29
43 - 78	0,6	3,3	0,3	3,4	0,29
43 - 78	1,6	2,8	0,35	3,5	0,28
66 - 80	0,9	2,9	0,34	3,1	0,32
60-02-1	0,7	3,2	0,31	3,3	0,3
60 - 3	0,7	2,6	0,38	2,8	0,35
60 - 1	1,5	3,0	0,33	3,4	0,29
60 - 13	0,3	3,7	0,27	3,8	0,26
127- 2	0,8	4,6	0,21	4,5	0,22
127- 4	1,0	3,7	0,27	4,1	0,24
132- 13	1,3	3,7	0,27	4,0	0,25
43 - 78	-	4,7	0,21	4,6	0,21
21 - 78	1,8	4,4	0,23	4,8	0,21
132- 27	2,3	4,7	0,21	4,9	0,20

Na isti način već su ranije izvedena istraživanja veličina ρ_0 i $\Delta V/V_0$ u uvjetima visokih P - T za ksenolite iz kenozojskog bazalta u Mongoliji (Genšaft i dr., 1981). Uspoređivanje tih rezultata s ovdje prikazanim rezultatima pokazalo je razlike između magmatizma i dubinskog supstrata u stijenama tih dvaju područja.

5. Odnos između petrofizičkih karakteristika i seizmičnosti istraživanog područja

Teritorija Armenske SSR seizmički je najaktivnija zona Malog Kavkaza. Ovdje je većina žarišta potresa u maloj dubini. Iz krivulje zavisnosti količine žarišta potresa (slika 7) vidi se da veći dio potresa ima hipocentre s dubinom 15, 20, 25, 30, 35 km (Nazaretjan, 1984). Ali iz prosječne linije vidi se da postoje dva intervala koncentriranja hipocentara: 0–10 km i 22–30 km. Veći dio potresa s magnitudom $M > 4,5$ ima dubinu žarišta $H = 0–10$ km, tj. oni se lokaliziraju u granicama vulkanogeno-taložnog sloja i gornjih granica "granitnog" sloja Zemljine kore Armenije.

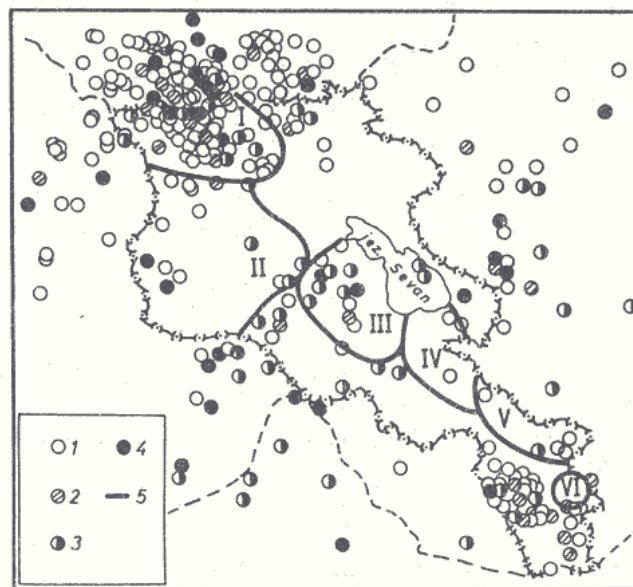


Slika 7. Shema rasporeda žarišta potresa po dubini (H – dubina žarišta u km, N – broj žarišta)
1 – krivulja zavisnosti broja potresa od dubine žarišta
2 – prosječna krivulja

Figure 7. Schematic depth distribution of earthquake foci (H – focal depth in km, N – number of foci).
1 - Curve showing the number of earthquakes vs. focal depth
2 - Average curve

Poznato je da je većina žarišta potresa rezultat komadanja strukturnih cjelina. Teorija nastanka rasjeda i pomicanja masa stijena traži da tangencijalna napetost u zoni komadanja bude veća od sumarnih sila povezanosti unutrašnjeg trenja. Proračuni Botta (1974) svjedoče da je na dubini do 20 km sila unutrašnjeg trenja toliko velika da prilikom komadanja strukturnih cjelina mogu nastati jaki potresi. Za vulkanske stijene koje smo razmatrali to je karakteristično samo za staklovite vulkanite, gdje pri niskom tlaku (do dubine 7 km) umjesto elastičnog sažimanja dolazi do kidanja sila povezanosti unutrašnjeg trenja, što dovodi do stvaranja mikropukotina i komadanja stijene (slika 3, uz. 33/78, 40/78). Na osnovi toga može se pretpostaviti da su žarišta potresa sa $H \leq 10$ km i $M > 4,5$ vezana uz strukture koje se na tim dubinama sastoje od staklovitih paleovul-

kanita. To se poklapa s navedenom shemom dubina hipocentara potresa na području Armenije (slika 8). Žarišta se lokaliziraju u međuprostorima vulkanskih podzona (osim u Kečutskoj podzoni), gdje je debljina vulkanogeno-taložnog sloja ponekad veća od 6000 m.



Slika 8. Karta epicentara potresa s poznatim dubinama žarišta (prema: Nazaretjan, 1984) i neovulkanske podzone na području Armenije (prema: Širinjan, 1980)
 Dubina žarišta: 1) 0-10 km, 2) 11-20 km, 3) 21-30 km, 4) > 30 km, 5) granice vulkanskih podzona
 Figure 8. Map of earthquake epicentres with known focal depths (after Nazaretjan, 1984) and neovolcanic subzones on the Armenian territory (after Širinjan, 1980).
 Focal depths: 1) 0-10 km, 2) 11-20 km, 3) 21-30 km, 4) > 30 km, 5) boundaries of volcanic subzones.

Volumna gustoća ksenolita gabro-piroksenitnoga sastava pri visokim P - T uvjetima svjedoči da se s povećanjem dubine u zonama niskogeotermalnih gradijenata smanjuje termoelastična napetost. Ako se ovaj zaključak koristi posebno za svaku vulkansku podzону, imamo dosta interesantnu korelaciju. Najveća koncentracija zona žarišta sa $H \geq 22$ km nastaje u Kečutskoj vulkanskoj zoni za koju je karakterističan početak kasnoorogenoga vulkanizma. Ovdje je kasnoorogeni vulkanizam počeo otprilike prije 3,5 mln. godina i trajao je sve do historijskog perioda. Danas je prisutno relativno "hladno" stanje u usporedbi s ostalim podzonama. Vjerojatno je takvo "hladno" energetska stanje gabrogranulitnog sloja Zemljine kore, koje uvjetuje smanjenje termoelastične napetosti, dovelo do lokalizacije zona žarišta potresa s relativno niskom magnitudom i $H \geq 22$ km. Takve su Kečutske vulkanske podzone i zone prije kasnoorogenog vulkanizma.

6. Zaključak

Dobiveni rezultati o fizikalnim karakteristikama uzoraka stijena u uvjetima visokih vrijednosti tlaka i temperature (P - T) upućuju na ove zaključke:

1. Za vulkanogene efuzivne stijene karakter promjene valne brzine $v_p = f(P)$ ovisi o strukturnim osobinama, tj. o stupnju kristalizacije i o agregatnom stanju stijene.
2. Ksenoliti se po odnosima volumena i gustoće podudaraju s materijom bazalnog sloja Zemljine kore. Veličine termoelastičnih napetosti u ksenolitima se smanjuju pri povećanju tlaka odnosno dubine.
3. Na osnovi petrofizičkih istraživanja nalazi se da se Armensko vulkansko visočje sastoji od staklovitih paleovulkanita i stijena gabro-piroksenitnog sastava. Pretpostavlja se da se u njima javljaju žaršta potresa na dubinama $H < 10$ km odnosno $H \geq 22$ km.
4. Smatra se da je današnja seizmička aktivnost vulkanskog visočja Armenije povezana s relativno "hladnim" stanjem pojedinih vulkanskih podzona.

Literatura

- Akopjan, C. G. (1972): Geologija Armjanskoj SSR. Tom X. Geofizika. AN Armjanskoj SSR, Erevan, 7-15.
- Belousov, A. F., A. P. Krivenko i Z. G. Poljakova (1982): Vulkaničeskie formacii. Nauka, Novosibirsk, 281.
- Bott, M. (1974): Vnutrennee stroenie Zemli. Mir, Moskva, 260.
- Genšaft, Ju. S., L. D. Livšic i Ju. P. Rjabinin (1962): Opredelenie parametrov sostojanija tvjordih tel pri visokih davlenijah metodom smeščenija poršnja. Žurnal "Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika", No 5, 96-105.
- Genšaft, Ju. S., E. M. Rudič, A. Ja. Saltikovski i T. A. Solovjova (1975): Vozmožnie puti generacii andezitovnih magm. ostrovnih dug. Bjuleten MOIP, Otdel geologii, tom 50, vipusk 3, 32-43.
- Genšaft, Ju. S., V. A. Jermakov i A. Ja. Saltikovski (1978): Postroenie regionalnih fiziko-himičeskikh modelej glubinih procesov i stroenija zemnoj kori i verhnej mantii. AN SSSR, Fizika Zemli, No 9, 91-110.
- Genšaft, Ju. S., V. A. Barzunov, D. I. Vajner i A. Ja. Saltikovski (1981): Plotnost i sžimaemost glubinih porod i mineralov iz vulkaničeskikh porod Bajkalo-Mongolskogo regiona pri P - T parametrah zemnoj kori. V knjige: "Fizičeskie svojstva gornih porod pri visokih davlenijah i temperaturah dlja zadač sejsmologii", FAN, Taškent, 175-176.
- Genšaft, Ju. S. i A. Ja. Saltikovski (1980): Evoljucija veščestvenogo sostava glubin Zemli v processe geotektoničeskogo razvitija (po dannim izučenija glubinih ksenolitov). V Knjige: "Nekotorie aktualnie problemi geologii i rudonosnosti skladčatih pojasov", SAIGIMS, Taškent, 3-14.
- Genšaft, Ju. S., A. K. Juhanjan, A. T. Veguni, A. Ja. Saltikovski i R. G. Gevorkjan (1985): Ob osobennostjah endogenogo režima Armjenskogo vulkaničeskogo nagorja v kajnozoje. AN SSSR, Geotektonika, No 2, 67-76.
- Juhanjan, A. K. i Ju. S. Genšaft (1983): Plotnost i sžimaemost glubinih vključenii iz pozdne-kajnozojskikh vulkanitov Armenii pri PT parametrah zemnoj kori. AN Armjanskoj SSR, Nauki o Zemle, No I, 55-60.
- Juhanjan, A. K. (1985): Zavisimost o voln vulkanitov Armenii pri visokih davlenijah ot stepeni ih paskristalizacii i sostava. AN Armjanskoj SSR, Nauki o Zemle, No 3, 69-74.

- Nazaretjan, S. N. (1984): Glubinnie razlomi territorii Armjanskoj SSR. AN Armjanskoj SSR, Erevan, 138.
- Širinjan, K. G. (1980): Sosatav, fizičeskie svojstva i voprosi petrogenzisa novejših vulkaničeskih obrazovanii Armenii. AN Armjanskoj SSR, Erevan, 322.
- Širinjan, K. G. (1982): Magmatičeskie i metamorfičeskie formacii Armjanskoj SSR. AN Armjanskoj SSR, Erevan, 331.
- Volarovič, M. P., Je. I. Bajuk, A. I. Levikin i S. Tomaševskaja (1974): Fiziko-mehaničeskie svojstva gornih porod i mineralov pri visokih davlenijah i temperaturah, Nauka, Moskva, 270.