

УДК 550.34

Г. В. ЕГОРКИНА, В. А. РАКИШОВ, И. В. ГАРЕТОВСКАЯ, Л. М. ЕГОРОВА

### АНИЗОТРОПИЯ СКОРОСТЕЙ В СВЯЗИ С НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ТЕРРИТОРИИ АРМЯНСКОЙ ССР

Известно, что в анизотропных средах могут распространяться три типа волн, аналогично распространению продольной ( $P$ ) и поперечных волн разной поляризации ( $SV$  и  $SH$ ) в изотропных средах. В изотропной среде скорости волн  $SV$  и  $SH$  одинаковы, в анизотропной среде (за исключением особых направлений) различаются и зависят от направления распространения. Поэтому, если экспериментально установлен факт различия скоростей распространения волн  $SV$  и  $SH$ , можно утверждать, что среда анизотропна.

Для изучения анизотропии скоростей распространения поперечных волн были использованы материалы полевых наблюдений, проводившихся сейсмическими партнями ВНИИ Геофизики на территории Армении с 1967 по 1974 гг. Запись колебаний в полосе частот 0,5—10 *гц* на магнитную пленку осуществлялась с помощью 10—12 четырехканальных станций типа «Земля», снабженных сейсмографами ВЭГИК ( $f=1$  *гц*). Два сейсмографа были вертикальными ( $Z_1$  и  $Z_2$ ) и два горизонтальными ( $X$ —север-юг,  $Y$ —запад-восток). Использовались профильные и площадные наблюдения при расстоянии между станциями 2—5 км. Общая протяженность отработанных профилей составила около 1400 км.

Анизотропия скоростей поперечных волн изучалась по записям местных и близких землетрясений с эпицентрными расстояниями от 5 до 300 км. Значения кажущихся скоростей и область регистрации свидетельствуют о том, что первые волны  $S$  являются рефрагированными в кристаллической части земной коры и верхней мантии. По характеру записи волн  $S$  весь экспериментальный материал делится на две существенно различные группы. К первой группе относятся сейсмограммы, на которых  $S$ -волны имеют одинаковые времена вступления на разных компонентах. На сейсмограммах второй группы (рис. 1) волны  $S$  имеют различные времена вступления на  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  каналах. По характеру поляризации волны, регистрирующиеся с временным сдвигом, аналогичны волнам  $SV$  и  $SH$  в изотропных средах. И хотя известно, что в анизотропных средах нет чисто продольных и чисто поперечных волн, условимся называть волны, поляризованные в вертикальной плоскости, волнами  $SV$ , а волны, поляризованные в горизонтальной плоскости,—волнами  $SH$ . Различие во временах прихода волн  $SV$  и  $SH$  изменяется от 0,1 до 1,3 *сек* и отмечается для большей части землетрясений, зарегистрированных в данной точке наблюдения.

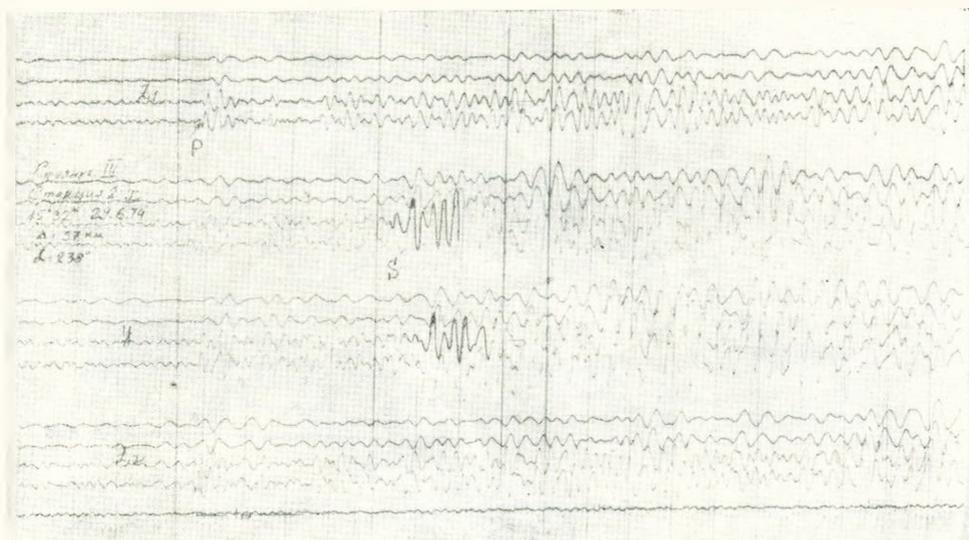


Рис. 1. Сейсмограмма землетрясения с временным сдвигом между компонентами  $S$ -волн ( $\Delta = 37$  км,  $\alpha = 238^\circ$ ). Величина сдвига 0,8 сек.

Изучение анизотропии скоростей производилось также по записям обменных проходящих волн типа  $PS$  [6, 7]. Анализируются волны, прослеживающиеся в первых вступлениях. В сейсмогеологических условиях территории Армении это волны, образовавшиеся на поверхности фундамента ( $PS_{\Phi}$ ). Расхождение во временах вступления волн  $PS_{\Phi}$  на разноориентированных сейсмоприемниках изменяется от 0,1 до 0,7 сек.

Совместный анализ сейсмограмм поперечных и обменных волн показал следующее:

1) Различия во временах прихода волн  $SV$  и  $SH$  в каждой конкретной точке наблюдения отмечаются по записям как обменных волн  $PS$ , так и поперечных. Это позволяет считать, что анизотропия скоростей является следствием особенностей физико-геологических факторов в области, окружающей точку регистрации.

2) В каждой конкретной точке наблюдения разность времен регистрации волн  $SV$  и  $SH$  на записях близких землетрясений практически не зависит от расстояния до источника колебаний. Это говорит о том, что анизотропия скоростей имеет место не вдоль всего пути пробега волны, а лишь в определенных зонах. На рис. 2 представлены графики величин  $(t_{SV} - t_{SH})$  в функции расстояния от источника колебаний. Как видно, имеет место довольно большой разброс значений  $\Delta t = t_{SV} - t_{SH}$ , однако определенной связи с расстоянием не отмечается.

3) В каждой конкретной точке наблюдения разность во временах регистрации волн  $SV$  и  $SH$  зависит от азимута подхода колебаний.

4) Зависимость соотношения времен регистрации (соотношения скоростей) волн  $SV$  и  $SH$  от азимута на эпицентр землетрясения неодн-

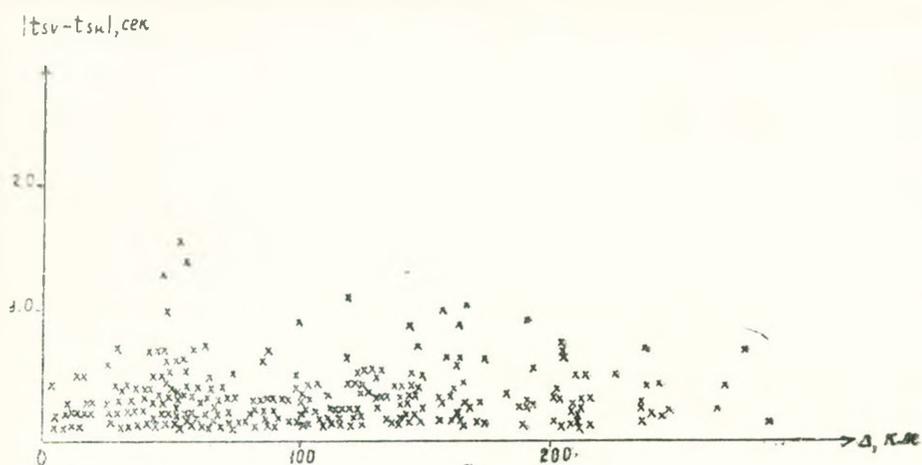


Рис. 2. График зависимости величины  $|t_{SV} - t_{SH}|$  от эпицентрального расстояния.

накова для разных точек наблюдения, что свидетельствует о различном характере физико-геологических факторов, определяющих анизотропность среды на разных площадях.

Таким образом анализ рассмотренных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что:

- а) анизотропия скоростей отмечается не на всей исследованной территории, а лишь в определенных зонах (рис. 3);
- б) анизотропия скоростей является следствием локальных особенностей состояния среды вблизи точки регистрации волны;
- в) особенности состояния среды, определяющие анизотропию скоростей, имеют различную характеристику в различных районах исследовавшейся территории.

Можно предположить, что анизотропия скоростей сейсмических волн является следствием либо упорядоченного строения среды (периодическое чередование слоев, ориентировка кристаллов, преобладающая направленность пор, трещин и т. д.), либо связана с особенностями напряженного состояния среды. Результаты проведенных исследований показали, что в условиях территории Армении анизотропию скоростей в большинстве случаев невозможно объяснить слоистостью осадочной толщи [7]. Покажем, что наблюдаемое различие скоростей сейсмических волн связано с особенностями напряженного состояния среды.

Для проверки предположения о том, что экспериментально установленная на территории Армении анизотропия скоростей поперечных ( $PS$  и  $S$ ) волн является следствием особенностей напряженного состояния земной коры, проанализируем: а) связь между характером анизотропии скоростей и направлением главных осей напряжений в очаговых зонах; б) зависимость пространственного расположения зон повышенной анизотропии скоростей от геологического строения региона.

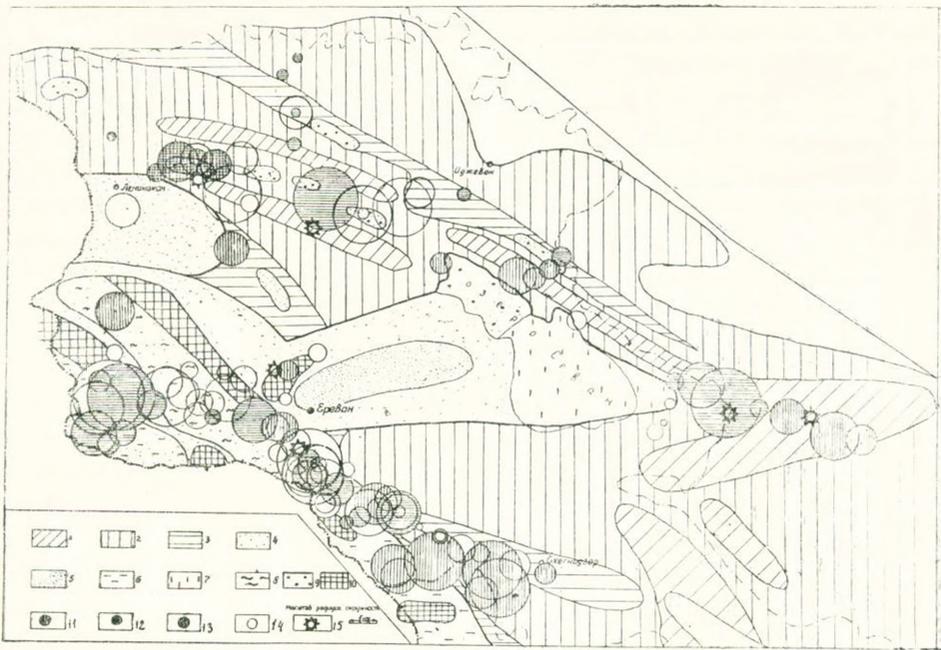


Рис. 3. Сопоставление зон характеризующихся анизотропией скоростей сейсмических волн с картой неотектонических движений [2]. 1—области интенсивных поднятий за послесарматское время (свыше 2000 м); 2—области умеренных поднятий (от 1500 до 2000 м); 3—области слабых поднятий (до 1500 м); 4—области опусканий; 5—области интенсивных опусканий (свыше 2000 м); 6—области интенсивных прогибаний в миоцене и поднятий в плиоцене—антропогене; 7—области умеренных прогибаний в миоцене, плиоцене и нижнем—среднем антропогене и слабых поднятий в верхнем антропогене; 8—области прогибаний в миоцене, поднятий в плиоцене и вновь опусканий в антропогене; 9—впадины, паложные на эоценовое основание; 10—горстовые поднятия во впадинах; 11—точки наблюдения, вблизи которых  $V_{SV} > V_{SH}$ ; 12—точки наблюдения, вблизи которых  $V_{SH} > V_{SV}$ ; 13—точки наблюдения, вблизи которых соотношение скоростей волн SV и SH зависит от азимута подхода; 14—точки наблюдения, вблизи которых отмечается различие скоростей поперечных волн, но природа волн не определена однозначно; 15—эпицентры землетрясений.

В табл. 1 приведены основные параметры изучавшихся землетрясений, а также результаты определения ориентации осей сжатия и растяжения в их очагах. Положение оси сжатия (растяжения) характеризуется ее азимутом ( $A_2^0$ ) и углом наклона ( $i^0$ ) с направлением на зенит.

Результаты определения (рис. 4, табл. 1) для очагов сильных землетрясений № 4, 5 показывают, что оси сжимающих напряжений расположены близгоризонтально, а оси растягивающих напряжений—близвертикально. Для очага землетрясения № 3 характерна близгоризонтальная ориентация осей сжатия и растяжения. Результаты определения напряженного состояния области по совокупности очагов слабых землетрясений показаны на рис. 4 и в таблице под номерами 1, 2, 6, 7, 8. Как видно, оси сжатия в очагах землетрясений № 1, 2, 6, 7 ориентированы близгоризонтально, а оси растяжения—близвертикально. В оча-

Таблица 1

Помера на рис. 4	Дата зем- летрясения	Время в очаге (Грин.) час. мин.	Координаты эпицентра		Магнитуда, M	Ось сжимающего напряжения		Ось растягиваю- щего напряжения		
			$\varphi$	$\lambda$		$A_2^0$	$i^0$	$A_2^0$	$i^0$	
1	15.07.71	15 22	41°07'	43°55'	5	10	65	208	25	
1	30.09.71	10 29	40 05	43 57						
1	08.07.71	19 15	40 07	44 00						
1	16.09.71	04 22	41 08	41 05						
1	08.07.71	02 25	41 08	44 00						
1	24.03.71	20 56	41 07	44 00						
1	08.07.68	04 55	41 07	43 55						
1	20.04.68	06 36	41 08	44 05						
1	17.03.68	04 12	41 04	44 04						
2	15.03.68	12 37	41 03	43 52			330	80	95	15
2	08.06.68	20 38	41 03	44 01						
2	22.04.68	17 39	41 02	44 11						
2	01.07.68	18 47	40 59	43 47						
3	30.01.67	01 20	40,9	44,3		50	64	135	90	
4*	30.10.54	23 43	40,1	45,8		190	65	0	26	
5*	09.06.68	00 56	39,1	46,0		340	79	245	50	
6	25.06.73	01 13	39,9	45,47		10	83	170	35	
6	30.06.73	04 58	39 95	45 40						
6	06.07.73	19 19	39 88	45 42						
7	19.06.72	04 25	39 8	45 08		195	80	305	25	
7	25.06.72	13 57	39 87	44 8						
7	29.06.72	20 11	39 8	45 02						
7	05.07.72	19 21	39 9	45 11						
8	05.02.68	13 47	40 4	44 6		340	15	148	80	
8	23.05.68	20 54	40 35	44 46						
9	08.05.74	13 06	40 11	44 10		20	35	280	85	
10	21.06.74	08 06	40 16	44 10		210	80	300	70	
11	01.07.74	10 11	40 24	44 15		100	90	350	25	
12	08.07.74	02 43	40 11	44 13		45	25	190	65	

\* Результаты по этим данным взяты из работы [1].

гах совокупности землетрясений № 8 характер напряженного состояния иной: оси сжатия ориентированы близвертикально, а оси растяжения—близгоризонтально. Результаты определения механизма очага отдельных слабых землетрясений показаны на рис. 4 и в таблице под номерами 9, 10, 11, 12. Ориентация осей напряжений следующая: в очагах землетрясений № 9, 12 оси сжатия ориентированы близвертикально, а оси растяжения—близгоризонтально; в очаге землетрясения № 10 оси сжатия и растяжения ориентированы близгоризонтально; в очаге землетрясения № 11 ось сжатия ориентирована близгоризонтально, а ось растяжения—близвертикально.

Из приведенных выше данных видно, что характер напряженного состояния сейсмоактивных областей на территории Армении различен. На рис. 4 результаты изучения характера напряженного состояния сопоставлены с картой неотектонических движений территории Армении.

Выделяются три типа напряженного состояния:

1. В областях, испытывающих погружение, ось напряжения сжатия в очагах землетрясений ориентирована близвертикально, ось растяжения—близгоризонтально.

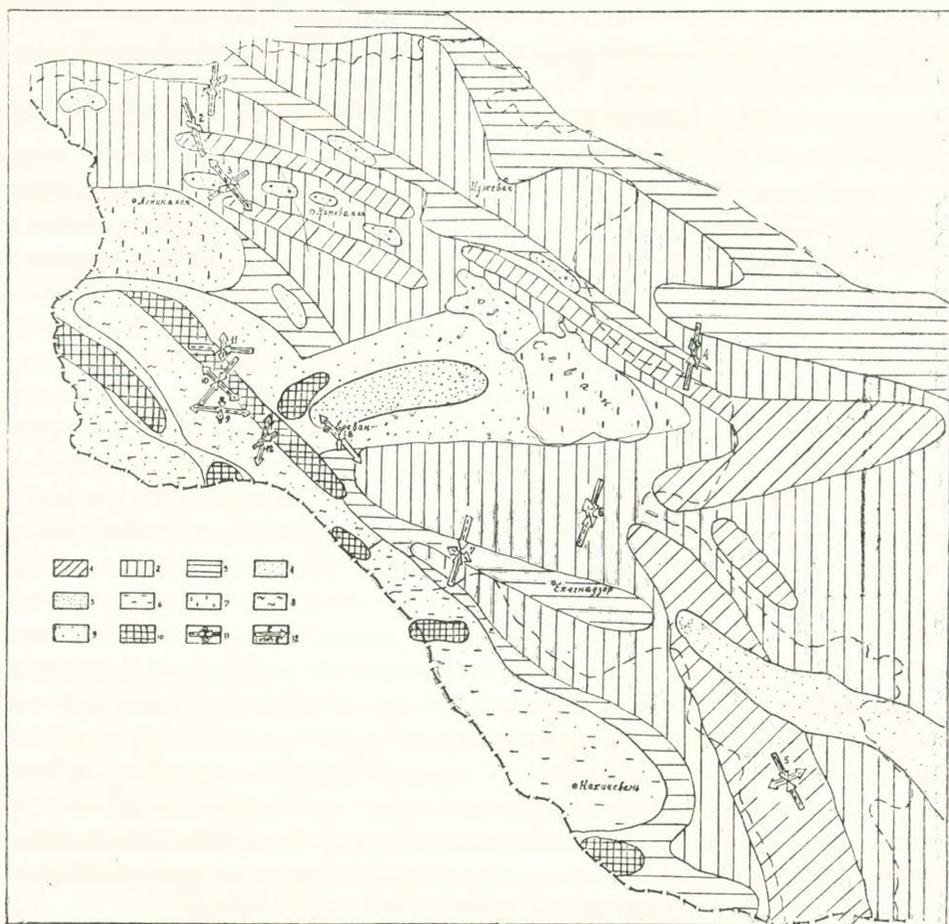


Рис. 4. Сопоставление результатов изучения ориентации осей напряжений в очагах землетрясений с картой неотектонических движений [2]. Условные обозначения с 1—10 те же, что и на рис. 3; 11—ориентация осей напряжений в очагах землетрясений, сплошная линия означает положение оси над горизонтальной плоскостью, номер соответствует данным таблицы в тексте.

2. В областях, испытывающих поднятия, ось сжатия ориентирована близгоризонтально, ось растяжения—близвертикально.

3. В некоторых областях, испытывающих погружение, и ось сжатия, и ось растяжения в очагах землетрясений ориентирована близгоризонтально.

Результаты изучения анизотропии скоростей на исследованной территории показывают, что особенности изменения скоростей также определяются характером неотектонических движений (рис. 3). На рис. 3 окружностями разного радиуса показаны пункты наблюдения, в пределах которых обнаружено различие скоростей распространения волн  $SV$  и  $SH$ . Величина радиуса окружности пропорциональна величине максимального различия (из всех зарегистрированных в данной точке) во временах прихода волн  $SV$  и  $SH$ .

Выделяются три типа зависимости времен прихода волн  $SV$  и  $SH$  от азимута на эпицентр:

1. В областях, испытывающих погружение, скорости волн, поляризованных в вертикальной плоскости больше, чем скорости волн, поляризованных в горизонтальной плоскости.

2. В областях, испытывающих поднятие, скорости волн, поляризованных в горизонтальной плоскости, больше, чем скорости волн, поляризованных в вертикальной плоскости.

3. В некоторых областях, испытывающих погружение, соотношение скоростей волн  $SV$  и  $SH$  зависит от азимута подхода колебаний.

Таким образом, и ориентация осей напряжений в очагах землетрясений, и зависимость скоростей распространения сейсмических волн от направления распространения обнаруживают связь с характером новейших тектонических движений. Это позволяет сделать вывод, что характер соотношения скоростей распространения волн  $SV$  и  $SH$  в разных районах—следствие особенностей напряженного состояния среды. Если при существующем напряженном состоянии данного района ось сжатия ориентирована близгоризонтально, большей скоростью распространения для всех азимутов подхода колебаний обладают волны, поляризованные в горизонтальной плоскости. В том случае, когда ось сжатия ориентирована близвертикально, большей скоростью распространения обладают волны, поляризованные в вертикальной плоскости. И, наконец, если и ось сжатия, и ось растяжения ориентированы близгоризонтально, для одних азимутов подхода колебаний большей скоростью распространения обладают волны  $SV$ , для других— $SH$ .

Характерной особенностью строения земной коры территории Армении является наличие глубинных разломов, разделяющих различным образом построенные тектонические зоны и блоки [2, 5]. Сопоставление схемы разломной тектоники с расположением пунктов наблюдения, вблизи которых отмечена анизотропия скоростей поперечных волн, показывает, что анизотропные зоны приурочены, в основном, к двум разломам: Ереванскому и Севано-Акеринскому, являющимся крупными структурно-тектоническими швами. В большинстве случаев области, характеризующиеся различием скоростей распространения волн  $SV$  и  $SH$ , отмечаются вблизи пересечения Ереванского и Севано-Акеринского разломов с разломами антикавказского направления.

Как показано в работе [3], древние разрывы в земной коре существенно влияют на поле напряжений. При определенной ориентации разломной зоны по отношению к направлениям главных осей напряжений могут создаваться области сильного повышения величины касательных напряжений. В этих областях происходит изменение упругих свойств среды. По всей видимости, выделенные нами анизотропные зоны и являются областями концентрации напряжений.

Величина анизотропии ( $a$ , следовательно, и величина напряжения) в пределах исследуемой территории не остается постоянной. Об этом свидетельствует различие во временах регистрации волн  $SV$  и  $SH$ , изменяющееся в широких пределах—от 0,1 до 1,3 сек. В ряде случаев были вычислены коэффициенты ( $K_a$ ), характеризующие различие ско-

ростей волн SV и SH [7]:  $K_a \frac{|V_{SV} - V_{SH}|}{V_{max}} |100\%$ . Значение коэффициента  $K_a$  на изученной площади изменяется от 2—3 до 35—40%.

Учитывая установленный факт связи анизотропии скоростей с напряженным состоянием, по-видимому, можно считать, что области, характеризующиеся высокой анизотропией скоростей, являются наиболее вероятными местами разрядки напряжений. Наблюдения показывают, что за время работ с аппаратурой «Земля» в Армении с 1967 по 1974 годы на исследованной территории произошло шесть землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 10$  (данные оперативных сейсмологических бюллетеней Института физики Земли АН СССР) (рис. 3).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что напряженное состояние земной коры на территории Армении меняется при переходе от одной сейсмоактивной области к другой. В зависимости от знака тектонических движений, меняется и ориентация осей напряжений в этих областях. Особенности напряженного состояния в разных районах влияют на упругие свойства горных пород. В связи с неравномерными тектоническими движениями создаются области концентрации напряжений. Они характеризуются ясно выраженной анизотропией скоростей сейсмических волн. Согласно данным об изучении глубин очагов землетрясений, концентрация напряжений в условиях территории Армении происходит на сравнительно небольших глубинах, не превышающих 8—10 км [4]. Зоны концентрации напряжений приурочены, главным образом, к двум глубинным разломам.

ВНИИГеофизика

Поступила 4.I.1976.

Ֆ. Վ. ԵՐՈՐԻԻԱ, Վ. Ա. ԹԱԿԻՏՈՎ, Ի. Վ. ԳԱՐՅՈՎՍԿԻՅԱՑ, Լ. Մ. ԵԳՈՐՈՎԱ

ԱՐԹՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱՆԻՉՈՏՐՈՊԻԱԹՅՈՒՆԸ ԿԱՊՎԱՄ շԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՆ ՏԱՐԱՄՔՈՒՄ ԵՐԿՐԱԿԱՆՎԵՎԻ ԼԱՐՎԱՄ ՎԻՃԱԿԻ ՇԵՏ

Ա մ փ ո վ ո ո ռ մ

Հոդվածում քննարկվում է Հայաստանի տարածքում երկրակեղևի լարվածության և սեյսմիկ ալիքների արագությունների անիզոտրոպության կապի հարցը: Բերվում են անիզոտրոպության ուսումնասիրման արդյունքները, որոնք ստացված են էպիկենտրոնից 5—450 կմ հեռավորության վրա արձանագրված լայնակի ալիքների, ինչպես նաև ֆունդամենտի մակերևույթի վրա առաջացած PS տիպի փոխանակային ալիքների գրանցումներից: Դիտարկվում է արագությունների անիզոտրոպության բնույթի և օջախային ղոնաներում լարվածությունների գլխավոր առանցքների ուղղությունների միջև եղած կապը: Վերլուծվում է արագությունների բարձր անիզոտրոպության ղոնաների տարածական տեղաբաշխման կախումը մարզի երկրաբանական կառուցվածքից: Ստացված արդյունքների հիման վրա եզրակացություն է արվում այն մասին, որ Հայաստանի տարածքում արագությունների անիզոտրոպիայի գլխավոր պատճառը

Երկրակեղևի լարված վիճակն է: S-ալիքների արագությունների բարձր անիզոտրոպության մարդերի հաշվանաբերումը հնարավորություն կտա կանխատեսել երկրաշարժերի հավանական օջախները:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Поле упругих напряжений и механизм очагов землетрясений. М., «Наука», 1972.
2. Габриелян А. А., Пирузян С. А. Сейсмотектоническая схема Армении и сопредельных частей Антикавказа. Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, т. XXV, № 4, 1972.
3. Гзовский М. В., Осокина Д. Н., Ломакин А. А., Кудряшова В. В. Напряжения, разрывы, очаги землетрясений. В кн. «Региональные исследования сейсмического режима». «Штница», Кишинев, 1974.
4. Егоркина Г. В., Гаретовская И. В., Соколова И. А., Егорова Л. М., Двоскина Т. Д., Ракитов В. А. Возможности использования сейсмических станций «Земля» при изучении сейсмоопасных зон на примере Армении. В кн. «Геофизические поля и сейсмичность», М., «Наука», 1975.
5. Егоркина Г. В., Соколова И. А., Егорова Л. М., Мичниязова Г. Я., Двоскина Т. Д. Строение земной коры северо-западной части Армении. «Сов. геология», № 6, 1973.
6. Егоркина Г. В. Изучение анизотропии земной коры по записям сейсмических обменных волн. Известия АН СССР, сер. физика Земли, № 9, 1969.
7. Егоркина Г. В. Природа фазовых сдвигов при регистрации обменных проходящих волн типа *PS*. Прикладная геофизика, вып. 70, 1973.