

## УТОЧНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ КРИВОЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ АРМЕНИИ

© 2003 г. А. М. Аветисян\*, В. Ю. Бурмин\*\*, К. В. Геворкян\*

\* Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А Назарова НАН РА  
377515, Гюмри, В. Саргсяна, 5, Республика Армения

\*\* ОИФЗ РАН  
123810, Москва, Большая Грузинская, 10, Российская Федерация  
Поступила в редакцию 03.03.2003 г.

По временам прихода продольных и поперечных сейсмических волн от близких землетрясений Кавказа уточнена скоростная модель земной коры на территории Республики Армения. Полученные результаты позволяют более точно определять координаты землетрясений, зарегистрированных сейсмической сетью Кавказского региона.

### Введение

Определение координат эпицентров землетрясений является первоочередной задачей в сейсмоактивных регионах. От точности этих определений зависит правильность решения прогностических и структурных задач сейсмологии. Для локализации землетрясений в настоящее время применяются в основном разновидности метода Гейгера [2], которые используют годографы сейсмических волн. Так, для определения координат землетрясений на территории Республики Армения, как правило, используются осредненные годографы [8], полученные по данным землетрясений [6,8]. Методы этого типа основаны на линеаризации функционала невязок времен пробега сейсмических волн. Как известно, сходимость этих методов существенным образом зависит от начального приближения. Система линейных уравнений, возникающая в этом случае, носит локальный характер, так как она справедлива только в окрестности начального приближения. Существуют другие методы определения координат гипоцентров, также основанные на решении систем линейных алгебраических уравнений, но имеющие глобальный характер, то есть не зависящие от начального приближения [4]. В этих методах для определения гипоцентров землетрясений обычно используются скоростные колонки. Таким образом, чтобы использовать эти методы необходимо знать скоростное строение региона.

Строению земной коры и верхней мантии территории Кавказа и, в частности, Республики Армения посвящен ряд работ, наиболее интересными из которых для нашей задачи являются [1, 5, 7, 9]. К сожалению, скоростные разрезы, приведенные в этих работах, носят противоречивый характер и поэтому не позволяют использовать их для определения координат гипоцентров землетрясений. В связи с этим в настоящей работе ставится задача получения скоростной колонки, пригодной для определения координат гипоцентров землетрясений на территории Республики Армения по данным местных же землетрясений.

### Методика построения скоростной колонки по данным землетрясений

Процедура получения скоростной колонки разбивается на несколько этапов. Первый этап заключается в получении сейсмического годографа продольных волн. Для этого необходимо определить эпицентральные расстояния и времена пробега сейсмических волн от гипоцентра до сейсмических станций. Координаты гипоцентров землетрясений и, следовательно, эпицентральные расстояния определялись с помощью программы НУРО1, подробно описанной в работе [4]. Времена пробега сейсмических волн определялись по графику Вадати, который зависит не от скоростного разреза, а зависит только от отношения скоростей продольных и поперечных волн. В качестве скоростной колонки для этой цели был взят скоростной разрез, полученный в работе [5] по профилю Армаш – Ахалцихе. В [5] скоростной разрез представлен до глубины 52 км в виде изолиний скоростей, на которые наложены границы обмена и отражающие границы. В таком виде разрез является весьма схематичным, но вполне пригодным для работы программы НУРО1. Соответствующая скоростная кривая представлена на рис.3. В качестве исходных данных были взяты времена прихода продольных и поперечных волн от 330 землетрясений 1990 года, зарегистрированных кавказской сейсмической сетью (табл.1). При этом данные отбраковывались по двум критериям. По первому критерию отбрасывались все события, для которых отношение скоростей продольных и поперечных сейсмических волн не попадали в интервал значений 1.0 – 2.2. По второму критерию отбрасывались события, для которых среднеквадратическое отклонение времен пробега волн на графике Вадати от прямой превышало 1 с. Всего было отбраковано 90 событий.

На рис.1 представлена зависимость  $T_s$  от  $T_p$  после отбраковки событий. Полученное облако точек аппроксимируется линейной зависимостью. Большая часть точек группируется около прямой и лишь незначительная имеет существенное отклонение. Наклон графика определяет отношение скоростей продольных и поперечных волн, которое равно в данном случае 1.77.

Таблица 1

Расположение сейсмических станций

№ п.п	Название станции	Широта (в град.)	Долгота (в град.)	Высота от уровня моря (км)
1	ABS	41.75	42.81	1.570
2	AKH	41.41	43.48	1.700
3	ARR	39.82	44.75	0.819
4	BAK	40.37	49.82	0.083
5	BAW	41.12	43.80	2.160
6	BGD	41.26	43.60	1.952
7	BKR	41.73	43.52	1.700
8	BRO	42.45	44.93	1.250
9	DMN	41.33	44.82	1.260
10	DUS	42.08	44.70	0.910
11	DZR	39.88	45.70	2.115
12	ERF	40.17	44.47	0.998
13	ERZ	39.915	41.28	1.960
14	GAR	40.15	44.74	1.230
15	GEG	42.41	42.38	0.190
16	GOR	41.98	44.13	0.640
17	GRO	43.32	45.75	0.123
18	GRS	39.50	46.33	1.399
19	IDZ	40.88	45.146	0.700
20	ISK	40.63	43.70	1.435
21	KDR	39.15	46.10	2.155
22	KEB	40.30	46.09	1.320
23	KER	34.35	47.11	1.600
24	KRM	39.35	46.38	1.500
25	KRV	40.63	46.31	0.532
26	LEN	40.78	43.8	1.570
27	LGD	41.83	46.25	0.410
28	LNK	38.75	48.86	-0.018
29	MAK	42.96	47.5	0.042
30	MCR	40.15	44.16	0.850
31	MIN	40.77	47.06	0.030
32	NAK	39.20	45.41	0.887
33	ONI	42.58	43.45	0.810
34	PAA	40.15	44.58	0.890
35	PRL	40.78	48.59	1.448
36	PYA	44.03	43.06	0.544
37	RAM	47.766	42.29	0.000
38	SHC	29.638	52.52	1.600
39	SHE	40.64	48.64	0.840
40	SHI	41.20	47.19	0.600
41	SRI	36.758	49.383	0.000
42	STE	41.00	44.37	1.390
43	TAB	38.07	46.33	1.364
44	TI2	41.73	44.75	0.510
45	VAD	40.22	45.70	1.930
46	ZKT	41.65	46.67	0.530

Несмотря на то, что к качеству исходных данных были предъявлены достаточно жесткие требования, разброс точек на годографе сейсмических волн оказался довольно значительным (рис.2). Это говорит о том, что контроль данных по графику Вадати является необходимым, но недостаточным условием для хорошего их качества. Тем не менее, по совокупности полученных точек на плоскости годографа нам удалось построить осредненный годограф первых вступлений, который мы и попытались проинтерпретировать, т.е. получить по нему скоростную кривую.

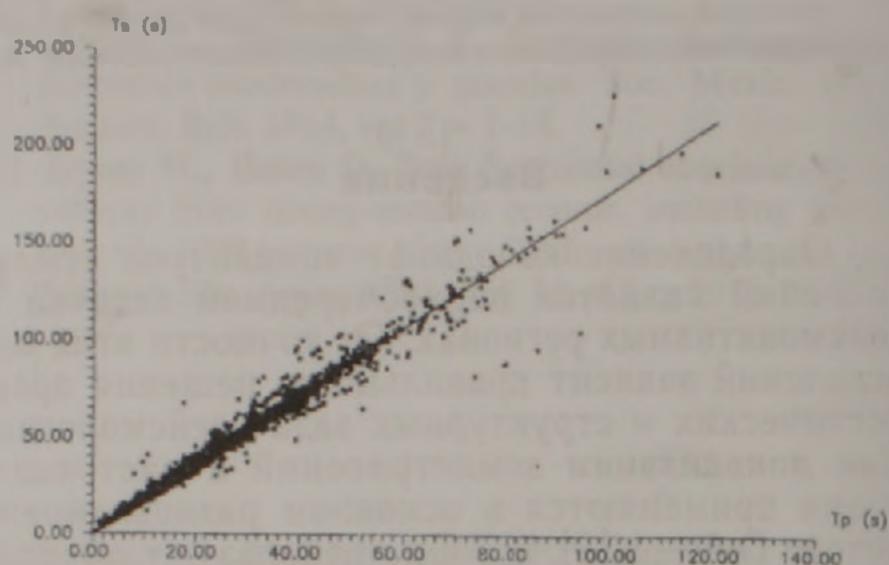


Рис.1. График зависимости времен пробега поперечных волн ( $T_s$ ) от времен пробега продольных волн ( $T_p$ ) для землетрясений 1990 года.

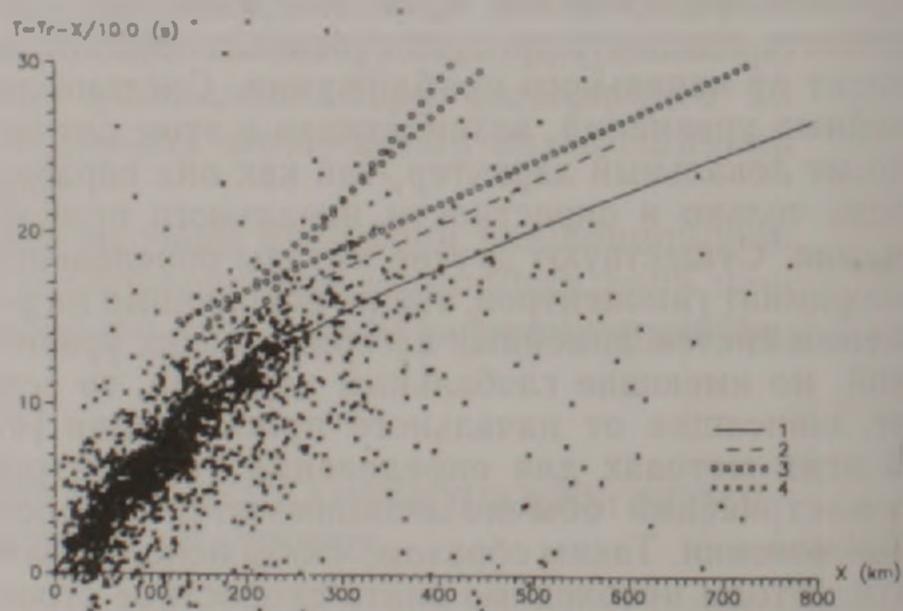


Рис.2. Редуцированные годографы первых вступлений продольных волн по различным данным. Скорость редукиции  $V_R = 10.0$  км/с. 1 – годограф, полученный в настоящей работе путем осреднения облака точек; 2 – годограф из работы [8]; 3 – годограф из работы [6]; 4 – точки экспериментального годографа, полученные в данной работе.

Интересно отметить, что при пересчете координат гипоцентров землетрясений с фиксированным значением отношения  $V_p/V_s$  число отбракованных событий по второму критерию оказалось равным 260.

Построение скоростной кривой составляет содержание второго этапа решения поставленной задачи. Интерпретация, или обращение, годографа проводилась по методике, описанной в работе [3], с помощью формул обращения сейсмического

годографа. Так как в формулы обращения входят лучевые параметры, численно равные производным годографа в соответствующих точках, то экспериментальный годограф предварительно сглаживается выпуклой сплайн-функцией [3].

Обычно годограф первых вступлений состоит из совокупности отдельных ветвей, которые пересекаются в соответствующих точках плоскости годографа. Там, где эти ветви пересекаются, вторая производная годографа первых вступлений имеет отрицательное значение, намного превышающее значения второй производной в окрестных точках. В данном случае такие значения соответствуют эпицентральным расстояниям 10, 190 и 360 км, что хорошо видно из таблицы 2.

Таблица 2

Годограф продольной волны

Н.п.п.	X (км)	$T_{ред.}$ (с)	$dX/dT$ (км/с)	$d^2T/dX^2$ (км/с <sup>2</sup> )
1	0	0	5.17	0.0000
2	10	0.9	5.51	-0.0024
3	30	2.21	6.34	0.0000
4	60	3.94	6.34	0.0000
5	100	6.24	6.34	0.0000
6	140	8.55	6.34	0.0000
7	150	9.12	6.34	0.0000
8	190	11.31	6.72	-0.00044
9	230	12.98	7.32	-0.00018
10	260	14.03	7.47	0.0000
11	290	15.04	7.47	0.0000
12	320	16.01	7.78	-0.00035
13	360	16.83	8.94	-0.00048
14	410	17.03	10.01	0.0000
15	430	17.03	10.01	0.0000
16	450	17.02	10.01	0.0000
17	470	17.02	10.01	0.0000
18	490	17.02	10.01	0.0000
19	530	17.02	10.01	0.0000
20	560	17.02	10.01	0.0000
21	610	17.01	10.01	0.0000
22	650	17.01	10.01	0.0000
23	690	17.01	10.01	0.0000
24	710	17.01	10.01	0.0000
25	730	17.00	10.01	0.0000
26	770	17.00	10.01	0.0000
27	790	17.00	10.01	0.0000

Таким образом, для правильной интерпретации полученного годографа его необходимо разбить на три ветви, соответствующие сейсмическим волнам, распространяющимся в трех слоях с различными скоростями. Обращение такого годографа было проведено в соответствии с методом, изложенным в работе [3], где рассмотрена задача обращения разрывного годографа рефрагированной волны. Результаты обращения приведены на рис.3.

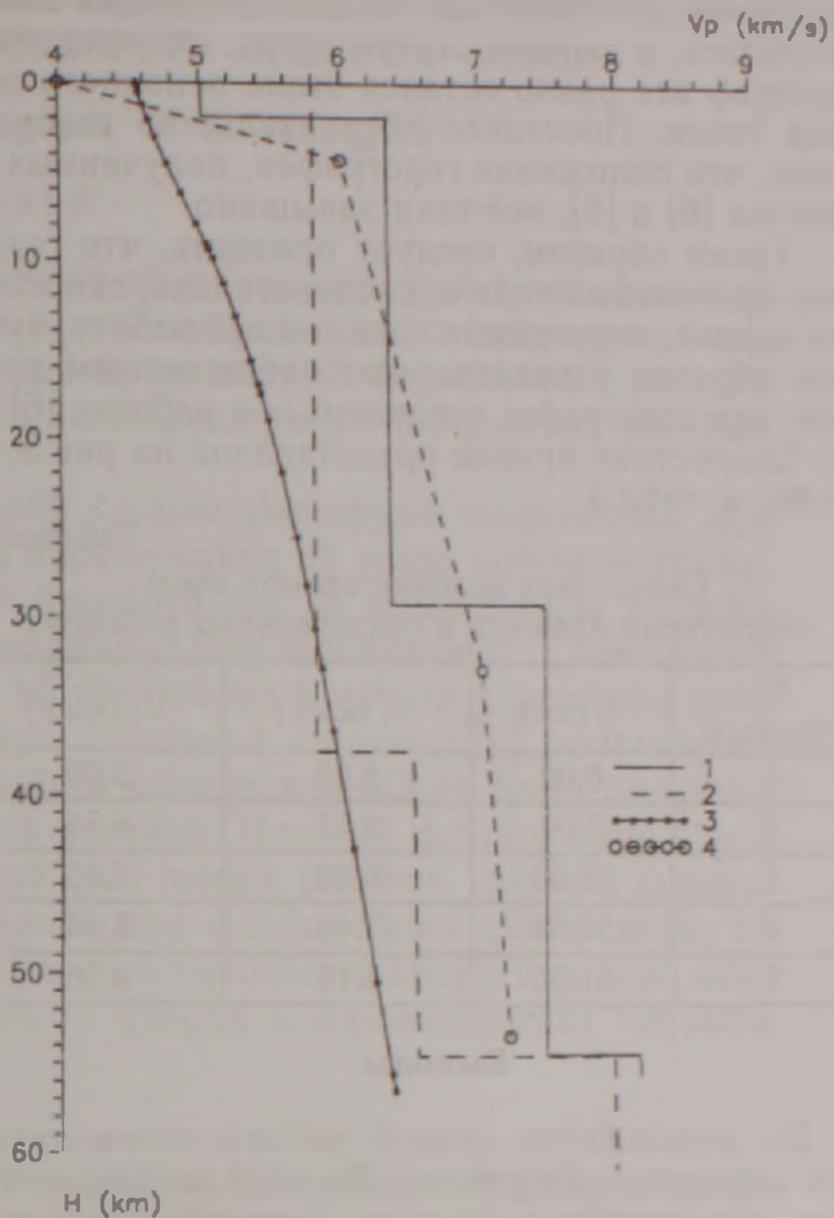


Рис.3. Скоростные кривые, полученные по различным данным. 1 – скоростная кривая, полученная в данной работе; 2 – скоростная кривая, построенная по скоростному разрезу из работы [6]; 3 – скоростная кривая, полученная по годографу из работы [8]; 4 – скоростная кривая, полученная по годографу из работы [5].

### Анализ результатов

Сравнение годографа первых вступлений с осредненным годографом для всего Кавказа, приведенным Краснопевцевой в [7], указывает на хорошее согласование этих данных.

При наложении годографа из работы [6] на точки годографа, полученные в данной работе, видно (рис.2), что ветви этого годографа располагаются выше основной массы точек. Скоростная колонка, полученная по годографу из работы [6], существенно отличается от колонки, полученной в настоящей работе (рис.3).

Годограф, полученный в работе [8], близок к годографу первых вступлений из [6] и также расположен выше основного облака точек (рис.2). На рис.3 приведена соответствующая скоростная кривая.

Следует заметить, что распределение точек, приведенное на рис.2, получено при использовании скоростной кривой, построенной по разрезу из [5] (рис.3). Если взять другую скоростную кривую, то, очевидно, распределение точек на плоскости годографа изменится. Чтобы убедиться в этом, мы переопределили координаты землетрясений, задав скоростную кривую, определенную по годографу из работы [6] (на рис.3 кривая 3). Основная масса точек на плоскости

годографа для этого случая действительно переместилась, в данном случае вверх, но исходный годограф все равно остался выше основного облака точек. Последнее обстоятельство говорит о том, что положение годографов, полученных в работах [6] и [8], всё-таки завышено.

Таким образом, следует признать, что годограф продольных волн и, следовательно, скоростная кривая, полученные в настоящей работе, лучшим образом удовлетворяют наблюдаемым данным, чем годографы, полученные в работах [6] и [8]. Скоростная кривая представлена на рис.3, а также в табл.3.

Таблица 3

Скоростная колонка земной коры территории Армении и сопредельных районов

№ границы	H (км)	$V_1$ (км/с)	$V_2$ (км/с)
1	0.00	5.00	5.00
2	2.00	5.13	6.35
3	30.00	6.40	7.45
4	54.50	7.46	8.14
5	61.00	8.16	8.16

#### Выводы

По результатам данной работы можно сделать два основных вывода. Первый заключается в том, что ошибки времен прихода сейсмических волн на станции по большей части слишком большие, чтобы можно было проводить качественную обработку наблюдений с целью локализации землетрясений и, следовательно, прогноза мест более сильных событий.

Второй вывод заключается в том, что для более надежной локализации землетрясений на территории Республики Армения следует использовать сейсмический годограф или скоростную колонку, полученные в настоящей работе.

В заключение авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность Саргсян Г.В. и Оганесян А.О. за предоставленные экспериментальные данные по землетрясениям 1990 года и скоростную колонку для определения гипоцентров землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисян А.М., Николаев А.В., Смагличенко Т.А. Исследование скоростных неоднородностей в зоне Спитакского землетрясения методом сейсмической томографии. Сб. трудов научной конференции, посвященной 80-летию основания Ереванского Гос. Университета, Ереван, 2000, с.34-38.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. М.: Мир, т.2, 1983, 360 с.
3. Бурмин В.Ю. Методы численного обращения годографов сейсмических волн. М.: Наука, 1993, 100 с.
4. Бурмин В.Ю. Оптимизация сейсмических сетей и определение координат землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 1995, 184 с.
5. Геолого-геофизические условия в очаговой зоне Спитакского землетрясения 1988г. Отчет Министерства Геологии СССР, НПО «Нефтегеофизика», М., 1990, 113 с.
6. Карапетян Н.К. Годографы сейсмических волн для землетрясений Армянского нагорья. Ереван: Изд. АН АрмССР, 1974, 142 с.
7. Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984, 108 с.
8. Саакян А. А., Геодакян Э.Г., Саргсян Г.В. Результаты применения осредненного регионального годографа Армянского нагорья. Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1983, №6, с.80-85.
9. Санина И.А. Сейсмическая томография: некоторые результаты. В кн.: Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997, с.123-140.

**ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿՈՐԻ ՃՇՊՏՈՒՄԸ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՏԱՐԱԾՔԻ  
ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԵՐԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱՐ**

**Ա. Մ. Ավետիսյան, Վ. Յ. Բուրմին, Կ. Վ. Գևորգյան**

**Ա մ փ ո փ ու մ**

Սեյսմիկ ալիքների արագությունների որոշումը սեյսմաբանության կարևորագույն խնդիրներից մեկն է, քանի որ նրանց ճշտությունն ապահովում է երկրաշարժերի կոորդինատների որոշման հուսալիությունը, որն էլ իր հերթին նպաստում է ինչպես կանխատեսման, այնպես էլ սեյսմաբանության կառուցվածքային խնդիրների լուծման ճշգրտությանը:

Կովկասում և, մասնավորապես, Հայաստանի Հանրապետության տարածքում այդ ուղղությամբ կատարված են հետաքրքրություն ներկայացնող մի շարք աշխատանքներ, որոնց հիմնական թերությունը կայանում է նրանում, որ չի գնահատվել ինչպես ելակետային, այնպես էլ վերջնական արդյունքները: Այդ պատճառով էլ ստացված արագությունների կորերը խիստ տարբերվում են միմյանցից և դժվար է նրանցից որևէ մեկին առաջնություն տալը: Սույն աշխատանքում դրված է Հայաստանի տարածքում երկրաշարժերի պարամետրերի որոշման համար արագությունների կորի որոշման խնդիրը: Խնդրի լուծումը բաժանվել է մի քանի փուլերի: Առաջին փուլում ստացվել է երկայնական ալիքների հողոգրաֆը, որի հիման վրա խնդրի լուծման երկրորդ փուլում կառուցվել է արագությունների կորը: Յուրաքանչյուր փուլից հետո գնահատվել են ստացված արդյունքները, որի հետևանքով կառուցված արագությունների նոր կորն ունի բավականին մեծ ճշտություն և հաջողությամբ կարող է օգտագործվել սեյսմիկ տեղեկատվության մշակման համար:

**A MORE PRECISE VELOCITY CURVE TO ESTIMATE MAIN EARTHQUAKE  
PARAMETERS IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF ARMENIA**

**A. M. Avetisyan, V. Yu. Bourmin, and K. V. Gevorkyan**

**Abstract**

Precision of the earth crust velocity model for the territory of the Republic of Armenia is increased through considering the time of arrival of longitudinal and shear seismic waves generated by near-field earthquakes in the Caucasus. The obtained results allow greater accuracy in the estimation of coordinates for earthquakes recorded by the seismic network of the Caucasian region.