

УДК 550.348(479.25)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

А. А. СААКЯН

ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫЕ ПОПРАВКИ К СТАНДАРТНОМУ  
ГОДОГРАФУ ДЖЕФФРИСА-БУЛЛЕНА ДЛЯ  
АРМЯНСКОГО НАГОРЬЯ

Одним из важнейших задач сейсмологической практики является определение параметров эпицентров землетрясений на основании времен первых вступлений сейсмических волн на станциях и годографов, оптимальным образом отражающих особенности строения земной коры региона. Для землетрясений Кавказа и в частности Армянского нагорья, несмотря на серию работ, связанных с построением годографов [3, 4, 9, 10, 11, 12], до настоящего времени в сейсмологической практике используется региональный годограф А. Я. Левинской, Т. М. Лебедевой [9]. Несмотря на то, что этот годограф позволяет получить согласование данных для точечного определения эпицентров лучше, чем какой-либо из имеющихся годографов, тем не менее он страдает рядом недостатков, которые могут быть устранены на современном уровне развития инструментальных сейсмологических наблюдений, статистических методов обработки данных и применения ЭВМ.

К этим недостаткам относятся:

1. Годограф является экспериментально приуроченным к осредненной глубине происшедших землетрясений. Соответствующее этому годографу строение земной коры Кавказа представляется в виде двухслойной среды общей мощностью 60 км, тогда как последние данные ГСЗ и других методов говорят о существенном отличии от этой модели. Кроме этого, этот годограф не учитывает мозаичности строения земной коры на Кавказе, т. е. различное строение различных зон региона, что не может не сказаться на временах пробега сейсмических волн.

2. Годограф не рассчитан для различных глубин, в связи с чем применение его позволяет лишь определить координаты эпицентра.

3. Годограф построен на основании данных лишь нескольких станций, по записям всего 19 землетрясений, в годы, когда наблюдения не были достаточно качественными.

В настоящей статье делается попытка выявить основные закономерности времен пробега первых вступлений сейсмических волн землетрясений Армянского нагорья по наблюдениям на станциях ЕССН Кавказа в зависимости от эпицентрального расстояния.

Методика анализа основана на статистической обработке невязок времен пробега  $P$  волн от стандартного годографа Джеффриса-Буллена (Д-Б).

Прежде всего нами проведено сопоставление первых вступлений всех существующих на Кавказе годографов с годографом Д-Б для соответствующих глубин. Результаты этого сопоставления показали, что для эпицентральных расстояний меньше 150 км, т. е. для прямых  $P$  волн, годографы Кавказа в пределах 1,5 сек совпадают с годографом Д-Б. После 150 км (для диффрагированных  $P$  волн) имеют место существенные различия, достигающие до 4—5 сек.

В связи с существованием этих различий, прежде всего перед нами стояла задача экспериментально установить основные характерные закономерности в поведении эпицентральных поправок к стандартному годографу Д-Б.

#### *Выбор исходного материала и методика вычислений*

Анализ материала землетрясений Армянского нагорья показал, что наилучшие данные для нашей задачи получены с 1968 г. С этого времени сейсмическая сеть Кавказа достаточно представительна и сравнительно равномерно распределена по всей территории региона. Станции оснащены приборами СКМ-3 с унифицированными амплитудно-частотными характеристиками и развёрткой 60 мм/мин. При таком выборе снятие времен первых вступлений осуществляется с точностью до  $\pm 0,2$  сек.

Нами были отобраны землетрясения  $K > 9$ , эпицентры которых определены с точностью  $\pm 10$  км. Статистически представительным оказался материал до 1973 г. Общее количество землетрясений составляет 474, эпицентры которых приведены на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что землетрясения Армянского нагорья распределены по площади неравномерно и группируются в следующих сеймотектонических зонах: Джавахетской, Ардагано-Карсской, Бардог-Котурской и Зангезурской, которые приурочены к Антикавказскому, Севанскому, Таврскому, Араксинскому оротектоническим поясам [1].

Кроме того, из рис. 1 следует, что станции окружают эпицентры землетрясений неравномерно, из чего вытекает необходимость количественного анализа особенностей времен пробега волн  $P$ . Однако в качестве первого шага нами в данной статье анализируются все землетрясения в совокупности.

Примерно 65% исходных данных брались из бюллетеней Кавказа, остальные же первые вступления были измерены нами непосредственно с сейсмограмм. Нечёткие вступления нами вообще не рассматривались и не учитывались.

Основная трудность заключалась в том, что для большинства землетрясений не были определены глубины. Как правило, в пределах исследуемого региона глубины очагов землетрясений в основном колеблются в пределах 0—35 км. Поэтому для каждой пары очаг-станция рассматривались невязки по отношению годографа Д-Б для глубин 0, 15, 33 км [15].

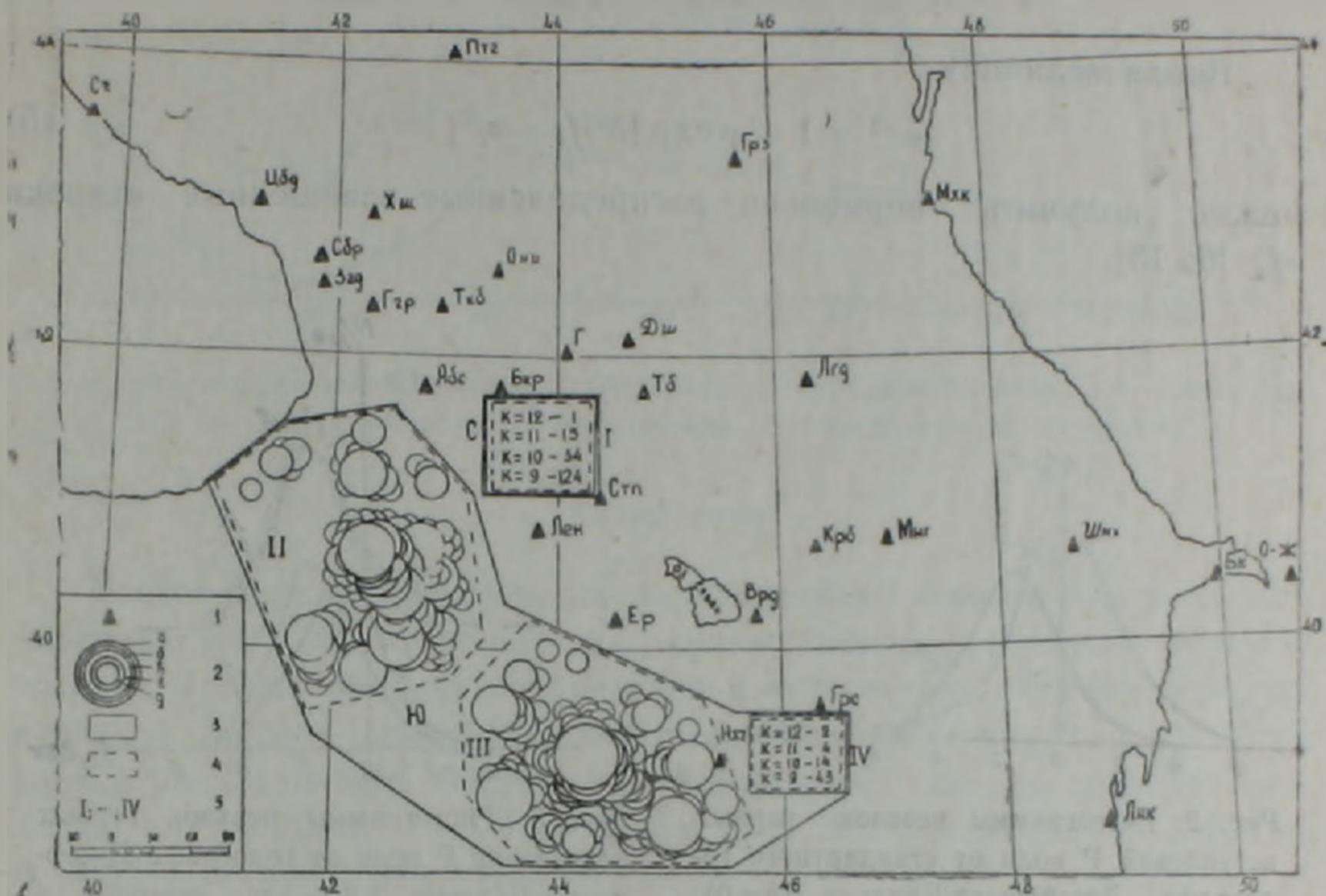


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений. 1—сейсмические станции. 2—эпицентры землетрясений; а— $K=13$ , б— $K=12$ , в— $K=11,6$ , г— $K=10$ , д— $K=9$ . 3—площадь эпицентров, на которой число землетрясений различных классов показано цифрами. 4—контуры сейсмоактивных зон. I, II, III, IV—Джавахетская, Ардагано-Карсская, Бардог-Котурская и Зангезурская соответственно. 5—контуры выделенных областей. С—северная, Ю—южная.

Анализ статистического материала отчетливо показал, что в целом, для всего материала лучшее согласие имеет место при глубине  $h=0$  км.

Под величинами невязок мы понимаем следующее:

$$f_i = t_p - t'_p, \quad (1)$$

где  $t_p = t_i - t_0$  — наблюдаемые времена пробега,  $t'_p$  — времена пробега, рассчитанные по годографу Д-Б для данного эпицентрального расстояния и глубины  $h=0$ .

Эпицентральные расстояния рассчитывались по формуле [2].

$$\Delta^2 = (\lambda - \lambda')^2 + (\varphi - \varphi')^2 \sin^2 \frac{1}{2} (\lambda - \lambda'), \quad (2)$$

где  $\varphi$  и  $\lambda$  — географические координаты эпицентра, а  $\varphi'$  и  $\lambda'$  — координаты станции.

Как показал Джеффрис [13], плотность распределения невязок можно выразить формулой:

$$P(f_i) = \frac{1-S}{\pi} h \exp[-h^2(f_i - a)^2] + Sg(f_i), \quad (3)$$

где

$$a = \sum f_i / n; \quad \sigma^2 = \sum (f_i - a)^2 / (n-1); \quad h^2 = 1/2\sigma^2. \quad (4)$$

Вводя величину

$$\omega^{-1} = 1 + \mu \exp[h^2(f_i - a)^2] \quad (5)$$

можно получить нормально распределенные взвешенные невязки  $\omega f_i$  [6, 13].

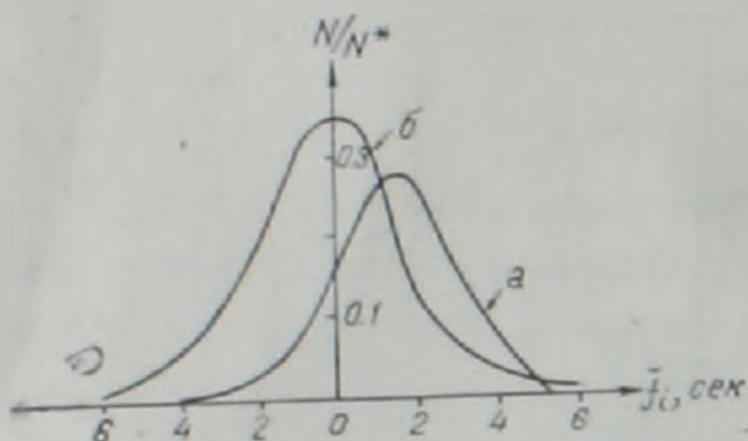


Рис. 2. Гистограммы невязок первых вступлений Р волн от стандартного годографа Джеффриса-Буллена ( $h=0$ ). а—для землетрясений Армянского нагорья по станциям Кавказа. б—для землетрясений различных сейсмоактивных зон мира по опорным станциям СССР.

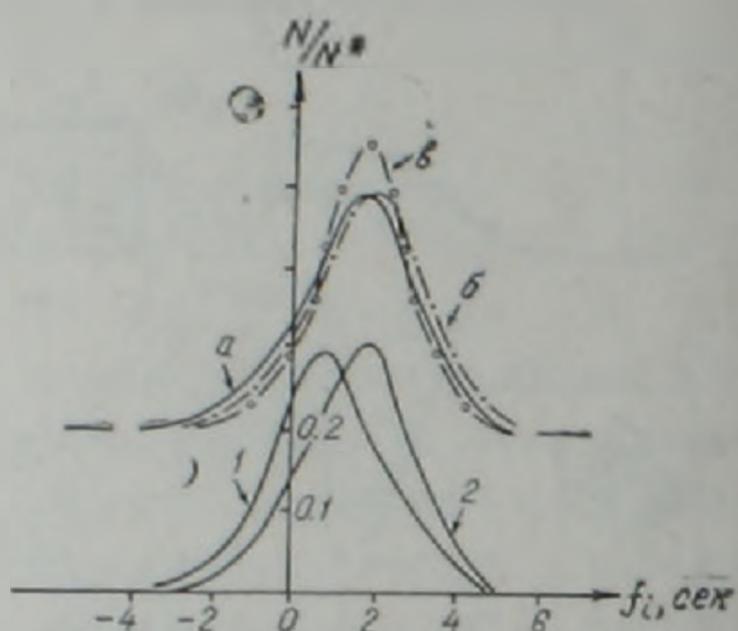


Рис. 3. Гистограммы невязок первых вступлений Р волн от годографа Джеффриса-Буллена. 1,2—для северной и южной областей соответственно. а,б,в—для Ардагано-Карсской, Бардог-Котурской и Зангезурской зон соответственно.

Параметр  $a$ —систематическая ошибка. Для отдельной станции значение величины  $a$  даёт представление о постоянной станционной поправке к годографу Д-Б.

Параметр  $\sigma$ —стандартное отклонение станционной поправки.

Параметр  $\mu$ —частота, с которой данная станция может делать большие ошибки.

Зная оценку  $\sigma$  и значения  $n$ , находим доверительные интервалы для неизвестного среднего  $m$  в соответствии с распределением Стьюдента [8].

$$\frac{\sigma_a, t_q, n-1}{\sqrt{n-1}} + a < m < \frac{\sigma_a, t_q, n-1}{\sqrt{n-1}} - a, \quad (6)$$

где  $\sigma_a$ —эмпирическая дисперсия,  $t_q$ —критерий Стьюдента для  $n-1$  степеней свободы и вероятности  $P = 1 - q/100$ . Здесь  $q$ —уровень доверия, который даёт  $q$  %-ные пределы  $\pm t_q, n-1$  такие, что

$$P\left\{-t_q, n-1 < \sqrt{n-1} \frac{-\bar{a} + m}{\sigma_a} < t_q, n-1\right\}. \quad (7)$$

Для всех случаев выбирались 95%-ные уровни доверия.

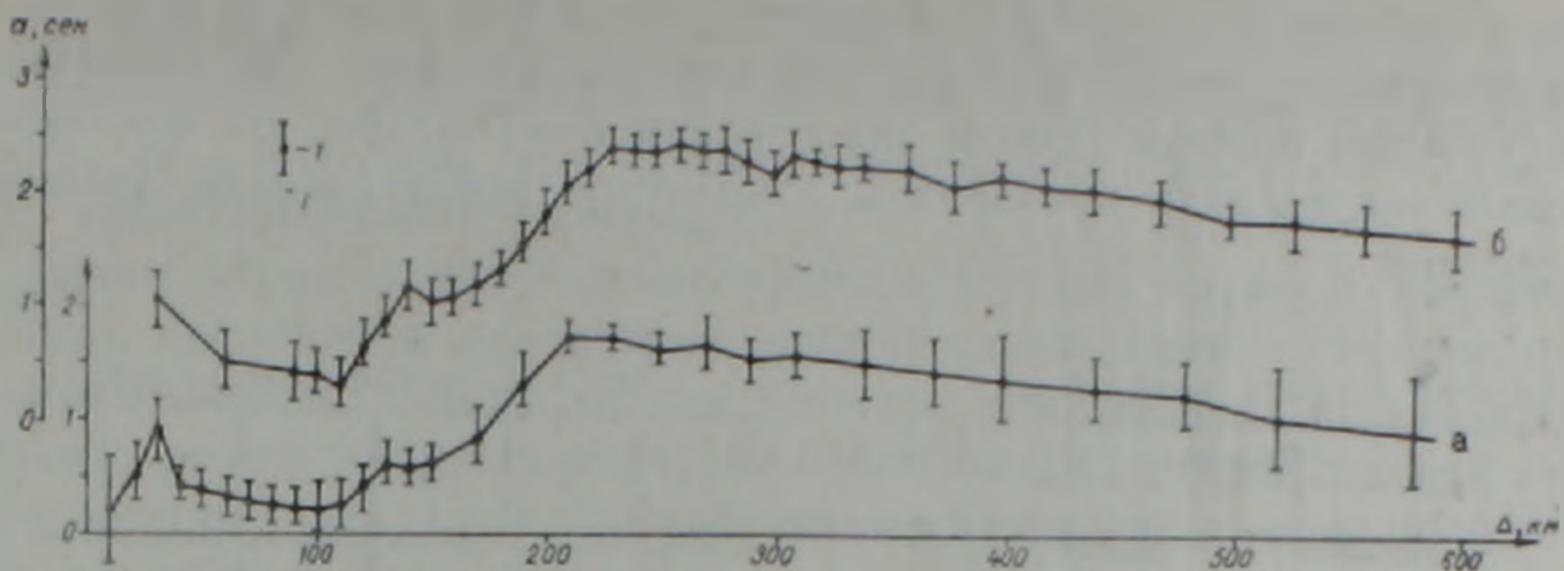


Рис. 4. Эпицентральные поправки к годографу Джеффриса-Буллена, а, б—для северной и южной областей соответственно. 1—доверительные интервалы.

### Результаты

Расчет параметров функции распределения невязок для всех рассматриваемых землетрясений по наблюдениям всех станций Кавказа показал, что эта функция распределения отличается от осредненной, полученной ранее в работе [7], для станций СССР (рис. 2). Параметры кривой распределения невязок для Армянского нагорья (рис. 4а) оказались следующими:  $\alpha = 1,4 \pm 0,03$  сек,  $\sigma = 1,39$  сек,  $\mu = 0,29$ ,  $h^2 = 0,26$  сек,  $\omega = 0,256$ ,  $\omega = 0,77$ ,  $N = 8467$ .

Существование систематической поправки  $\alpha = 1,4$  сек указывает на то, что средняя мощность земной коры на Кавказе отличается от принятой Джеффрисом на 15 км.

Не вдаваясь в детали анализа параметров функции распределения невязок по отдельным станциям, нами построены кривые распределения невязок  $P(f_i)$  для отдельных зон по совокупности всех станций (рис. 3).

Как видно, параметры функции распределения невязок для Ардагано-Карсской, Бардог-Котурской и Зангезурской зон очень близки, что позволяет осуществить объединение их в одну область, которую мы условно назовем южной. Аналогично Джавахетская зона будет составлять северную область. Параметры кривых  $P(f_i)$  для этих областей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры  $P(f_i)$  для отдельных областей

Область	$\alpha$ , сек.	$\sigma$ , сек.	$h_i^2$ сек <sup>-2</sup>	$\mu$	$\omega$	Максимальная частота $\omega$	Количество случаев $N$
Северная	$0,96 \pm 0,06$	1,48	0,23	0,29	0,77	0,282	3163
Южная	$1,68 \pm 0,04$	1,41	0,25	0,27	0,79	0,295	5304

Из полученных результатов следует, что для Армянского нагорья по крайней мере, надо построить два годографа. Поэтому для этих областей рассматривалась зависимость невязок от эпицентрального расстояния (рис. 4). Полученные осредненные значения невязок, рассматривая как эпицентральные поправки и вводя их в годограф Д-Б, на соответствующих эпицентральных расстояниях получаем скорректированные времена пробега  $P$  волн для глубины  $h=0$  (табл. 2), которые позволяют определять координаты эпицентров землетрясений Армянского нагорья.

Таблица 2

Времена пробега волн $P$			для $h=0$ , с точностью 0,1 сек.					
$\Delta$ км	(Область)		1	2	3	1	2	3
	северная	южная						
1	2	3						
10	2,0	2,2	150	23,4	23,6	300	46,8	47,6
20	4,2	4,3	140	24,9	25,5	320	49,4	50,2
30	6,4	6,5	150	26,5	26,9	340	51,9	52,6
40	7,5	7,7	160	28,0	28,3	360	54,4	55,2
50	9,3	9,5	170	29,5	29,8	380	56,9	57,6
60	11,1	11,3	180	31,0	31,3	400	59,4	60,2
70	12,9	13,1	190	32,5	32,8	420	61,7	62,8
80	14,6	14,8	200	34,0	34,3	440	64,5	65,3
90	16,4	16,6	210	35,5	35,9	460	67,0	67,8
100	18,2	18,4	220	36,8	37,3	480	69,5	70,3
110	19,9	20,0	230	38,0	38,8	500	72,0	72,8
120	21,6	21,9	240	39,3	40,1	520	74,6	75,3
			250	40,5	41,3	540	77,1	77,8
			260	41,8	42,6	570	80,9	81,6
			280	44,3	45,1	600	84,6	85,4

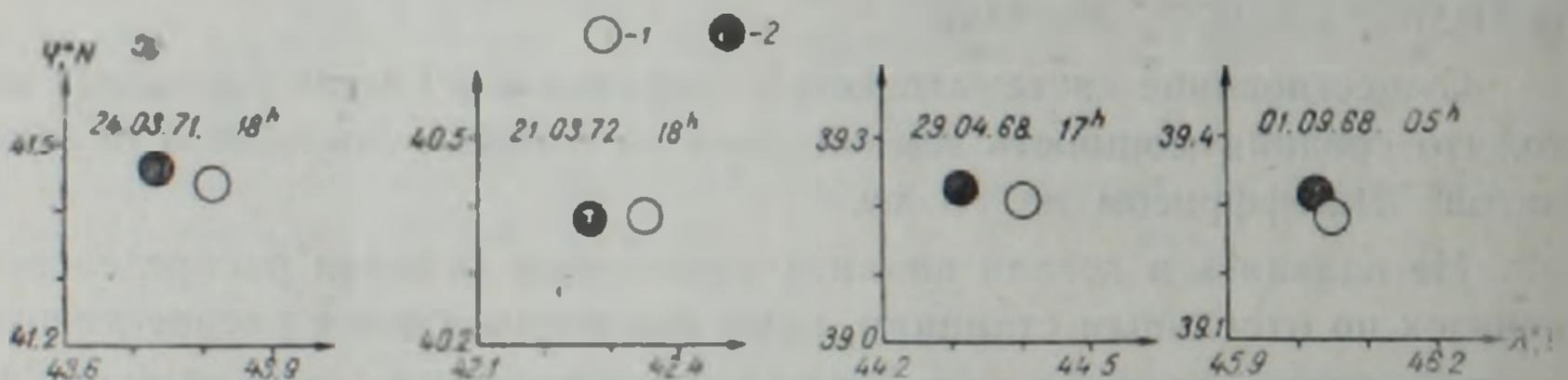


Рис. 5. Примеры определения координат эпицентров. 1—по первым вступлениям волн  $P$ . 2—по годографу А. Я. Левицкой, Т. М. Лебедевой. а, б, в, г—для зон Джавахетской, Ардагано-Карсской, Бардог-Котурской и Зангезурской соответственно.

На рис. 5 приведены примеры определения координат эпицентров по полученным временам  $t_p$  и по годографу А. Я. Левицкой, Т. М. Лебедевой.

Как критерий правдоподобия сравнивались суммы абсолютных значений невязок

$$\xi = \frac{\sum |f_i|_{(1)}}{\sum |f_i|_{(2)}}$$

где  $|f_i|_{(1)}$  и  $|f_i|_{(2)}$ —абсолютные значения невязок по отношению к полученному годографу и годографу А. Я. Левицкой, Т. М. Лебедевой соответственно.

Для приведенных примеров соответственно получены:

$$\xi_a = 0,88 \text{ по } N = 20 \text{ станциям,}$$

$$\xi_b = 0,71 \text{ } N = 17$$

$$\xi_v = 0,82 \quad N = 19,$$

$$\xi_r = 0,76 \text{ } N = 21.$$

Из значений  $\xi$  следует, что меньший разброс индивидуальных станционных данных получается при использовании полученного годографа  $P$  волн, следовательно, они лучше регионального годографа соответствуют наблюдательному материалу.

Таким образом, полученные времена пробега волн  $P$  позволяют уточнить координаты эпицентров землетрясений, однако, по ним пока не определяются глубины очагов. Поэтому следующим этапом исследования должно являться изучение станционных кинематических невязок с целью учета азимутальных неоднородностей времен пробега  $P$  волн и изучения строения земной коры на Кавказе.

Ордена Трудового  
Красного Знамени  
Институт геофизики  
и инженерной сейсмологии  
АН Армянской ССР

Поступила 25.V.1981.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Асланян А. Т. Региональная геология Армении. «Айпетрат», Ереван, 1958.
2. Буллен К. Е. Введение в теоретическую сейсмологию. Мир, М., 1966.
3. Джигладзе Э. А., Гоцадзе О. Д. Общие осредненные годографы Кавказа. Тр. Ин-та геофизики АН Груз. ССР, т. XX, Тбилиси, 1962.
4. Карапетян Н. К. Годографы сейсмических волн для землетрясений Армянского нагорья. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1974.
5. Кондорская Н. В. Кинематические особенности первых вступлений сейсмических волн. Vorträge der KAPG—Tagung, Berlin, 14. 1969.
6. Кондорская Н. В., Захарова Л. И. Об унификации определения координат очагов землетрясений Средней Азии. Изд. АН СССР, серия Физика Земли, № 9, 1970.
7. Кондорская Н. В., Желанкина Т. С. и др. Некоторые результаты применения ЭВМ при обобщении сейсмических наблюдений. Работы по вычислительной сейсмологии Вып. 1, «Наука», 1966.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Наука, М., 1978.
9. Левицкая А. Я., Лебедева Т. М. Годографы сейсмических волн Кавказа. Квартальный сейсмический бюллетень, т. XXI, № 1—4, Тбилиси, 1953.
10. Мурусидзе Г. Я. Строение земной коры и верхней мантии Грузии и сопредельных районов по сейсмологическим и сейморазведочным данным. Изд. «Мецниереба», Тбилиси, 1976.
11. Твалтвадзе Г. К. Строение земной коры в Грузии и построение систем теоретических годографов. Изд. АН Груз. ССР, Тбилиси, 1960.
12. Цхакая А. Д. Сейсмичность Джавахетского (Ахалкалакского) нагорья и прилегающих районов. Тр. Ин-та геофизики АН Груз. ССР, т. XXI, Тбилиси, 1957.
13. Jeffreys H. On Travel Times in seismology. Bur. Centr. Sesm. Intern., A, 14, 1, 1936.
14. Jeffreys H., Bullen K. E. Seismological Tables. Britm. Gray—Milne Trust. 1958.
15. Jeffreys H. The Times of P in Japanese and European Earthquakes. Mon. Not. R. Astr. Soc., Geophys. Suppl., 6, 557, 1954.