

УДК 550.311

В. Ю. Бурмин<sup>1</sup>, А. М. Аветисян<sup>2</sup>

**Сравнительный анализ афтершокового процесса  
Спитакского землетрясения по наблюдениям  
близких станций**

(Представлено чл.-кор. НАН РА С.М. Оганисяном 10/III 2016)

**Ключевые слова:** *землетрясение, афтершоки, гипоцентры.*

Разрушительное Спитакское землетрясение магнитудой  $m_b = 6.2$  произошло 7 декабря 1988 г. на севере Республики Армения, в районе г. Спитак. Длина разрыва, вышедшего на поверхность, составляла примерно 35 км. Зона макросейсмических проявлений охватила площадь в 484 тыс. км<sup>2</sup>.

Спитакское землетрясение и его афтершоки достаточно хорошо изучены [1-17].

Координаты гипоцентра Спитакского землетрясения по данным различных служб и публикаций приведены в работе [6]. Более полно и систематизированно изучение афтершокового процесса Спитакского землетрясения приводится в работе [1]. Согласно результатам этого исследования, а также другим публикациям [3-17] очаги афтершоков располагаются в интервале глубин 0-25 км.

В работе [6] как оптимальное решение выбрано

$$\varphi = 40.88 \pm 0.05^{\circ}N, \quad \lambda = 44.18 \pm 0.05^{\circ}E, \quad h = 5 \pm 5 \text{ км.}$$

По отношению к этому решению координаты эпицентров остальных наиболее надежных решений находятся в пределах  $\pm 10$  км, на глубине  $\pm 5$  км. Анализ полученных результатов показывает, что кинематические параметры главного толчка и афтершоков, определенные различными сейсмологическими службами, отличаются друг от друга.

Распределение афтершоков Спитакского землетрясения по глубинам по результатам работы [1] показывает, что очаги афтершоков находятся в диапазоне 0-25 км, а согласно работе Кондорской и др. [6] – в основном на глубине менее 10 км.

В региональном масштабе задача локации осложняется тем, что скоростные модели региона неизвестны или определены приближенно, сейсмические станции на территории региона расположены неравномерно, при

этом используют различные алгоритмы определения координат гипоцентров. Как следствие этих факторов координаты гипоцентров землетрясений, как правило, определяются с большими погрешностями [18-20, 23].

В то же время повышение точности определения координат гипоцентров и анализ распределения афтершоков позволят дать более объективную оценку как размера очага, так и физики самого землетрясения. В связи с этим в работе [6] и в отчете Института геофизики и инженерной сейсмологии АН АрмССР за 1990 г. [9] справедливо отмечено, что представленные исследования можно рассматривать как предварительный этап анализа инструментальных данных Спитакского землетрясения.

В работе [1] для определения положения очагов афтершоков использовалась программа НУРО71 [16], которая основана на минимизации функционала невязок времен пробега сейсмических волн. При этом для поиска решений применялся перебор начальных приближений в диапазоне глубин от 1 до 29 км с шагом 2 км. Для расчетов использовался скоростной разрез, который получен методом перебора из условий минимума невязок по нескольким десяткам опорных землетрясений, имевших большое число фаз  $P$ - и  $S$ -волн.

В работе [22] показано, что для функционала невязки времен пробега сейсмических волн справедлива оценка

$$S_i = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2 \leq \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y(H - h)^2 = S.$$

Здесь  $D_i$  и  $H$  соответствуют теоретическим временам  $t_i$  пробега сейсмических волн от очага до  $i$ -й станции, где  $D_i = \sqrt{R_i^2 - H^2}$  – эпицентральные расстояния;  $d_i$  и  $h$  – те же величины, но соответствующие истинному положению гипоцентра;  $R_i = v_i t_i$  – гипоцентральные расстояния и  $H$  – глубина очага землетрясения;  $r_i = u_i t_i$ , ( $u_i = v_i - \delta v_i$ );  $\rho_i = v_i^{-2}$  и  $Y = \sum_{i=1}^n \rho_i$  – весовые множители, характеризующие неоднородность среды.

Из этого соотношения следует, что малость значения функционала  $S_i$  не гарантирует малости значений функционалов невязок в определении глубины гипоцентра землетрясения и эпицентральных расстояний, но малость значения функционала  $S$  влечет за собой малость значения функционала невязки времен. Это утверждение – следствие того факта, что квадрат разности  $(R_i - r_i)^2$  суть квадрат разностей модулей векторов  $R_i$  и  $r_i$  и не зависит от их направлений, в то время как сумма квадратов разностей  $(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2$  есть квадрат модуля разности  $R_i - r_i$  соответствующих векторов. Последнее утверждение поясняет рис. 1.

Задача определения гипоцентров землетрясений ставится как задача минимизации функционала

$$S = \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y(H - h)^2, \quad (1)$$

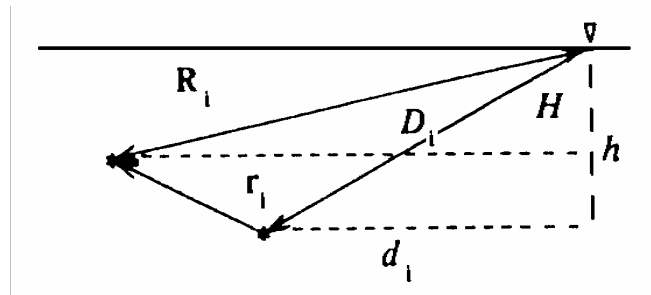


Рис. 1.

где  $d_i$  определяются по временам пробега сейсмических волн, а  $h \in \Xi$ .  $\Xi$  – множество возможных глубин гипоцентров землетрясений. При этом величины  $D_i$  и  $H$  определяются из решения системы нелинейных уравнений, связывающих координаты сейсмических станций  $(x_i, y_i)$  и гипоцентра  $(X, Y, H)$

$$(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + H^2 = v^2(t_i - t_0)^2 = d_i^2 + h^2. \quad (2)$$

Предполагается, что время возникновения землетрясения (время в очаге)  $t_0$  определяется по графику Вадати. Оптимальное значение  $h_0$  ищется простым перебором на множестве  $\Xi$ .

Для решения задачи (1), (2) были созданы алгоритм вычислений, который изложен в работах [21, 23], и программа HYPO-SHUM, реализующая этот алгоритм. При этом для того, чтобы учесть особенности строения среды под сейсмическими станциями, под каждой станцией задаётся своя скоростная колонка.

С учетом опыта использования программы HYPO-SHUM для переопределения координат гипоцентров крымско-черноморских землетрясений она использовалась в [21], а исходя из того обстоятельства, что по данным предыдущих исследований все афтершоки расположены в интервале глубин 0-25 км, было решено провести переопределение координат афтершоков Спитакского землетрясения 1988.

Для определения положения афтершоков Спитакского землетрясения использованы данные 11 ближайших сейсмических станций. Всего в сейсмологические бюллетени вошли данные 172 афтершоков.

Территория Армении характеризуется сложным горизонтально-неоднородным строением земной коры. При определении координат афтершоков по данным различных источников для каждой станции были взяты скоростные колонки, которые строились на основе данных ГСЗ и МОВЗ.

Как показано в работе [18], первоочередной задачей для изучения глубинного строения являются анализ исходных данных, корректировка и переопределение координат гипоцентров землетрясений.

Поскольку алгоритм предполагает определение времени в очаге  $t_0$  по графику Вадати, то прежде чем проводить определение координат гипоцентров на первом этапе было проведена корректировка данных таким образом, чтобы точки на графике Вадати имели минимальный разброс. Это

условие является необходимым для того, чтобы определение гипоцентров проводилось с минимальными погрешностями.

На рис. 2, а, б показаны графики зависимости времени пробега  $S$ -волны от времени пробега  $P$ -волны до и после корректировки исходных данных. Корректировка данных проводилась в основном путем уточнения или отбрасывания времен пробега поперечных волн.

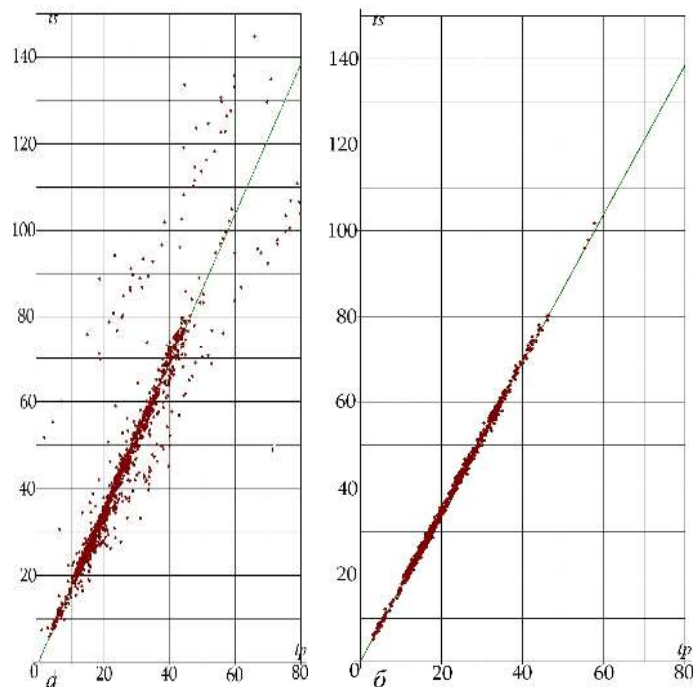


Рис. 2. Зависимость времени пробега  $S$ -волны от времени пробега  $P$ -волны до (а) и после (б) корректировки исходных данных.

По нашему определению основной толчок имел координаты  $40.867^\circ$  северной широты и  $44.199^\circ$  восточной долготы, глубина очага оценена  $H=5.0$  км.

На рис. 3 представлено распределение эпицентров афтершоков Спитакского землетрясения.

На рис. 4, а, б, где представлены распределения гипоцентров афтершоков Спитакского землетрясения по глубинам, видно, что большая часть афтершоков Спитакского землетрясения расположена на глубинах от 0 до 90 км. Есть отдельные события с глубиной до 150 км.

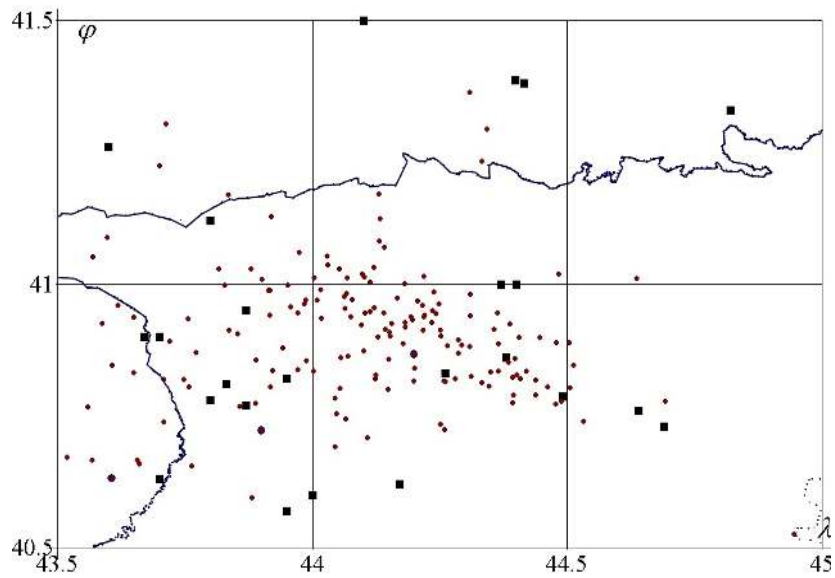


Рис. 3. Распределение эпицентров афтершоков Спитакского землетрясения. Маленькие кружки – эпицентры афтершоков; большой кружок – основной толчок; черные квадратики – сейсмические станции.

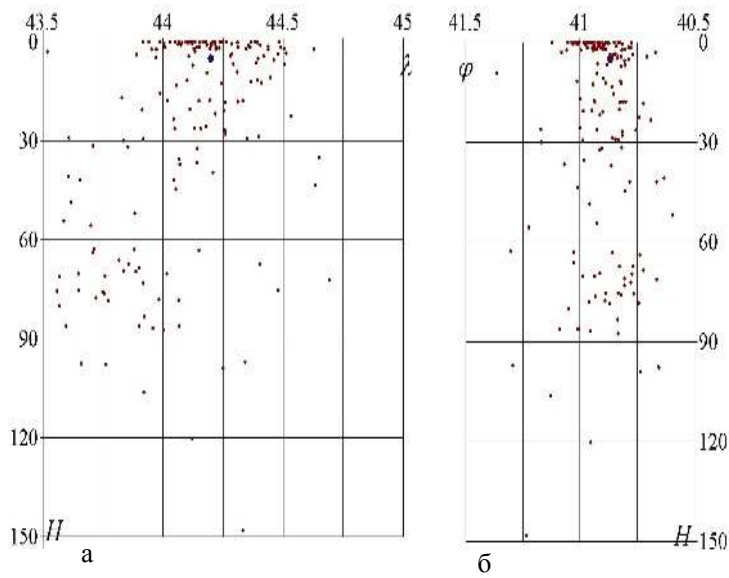


Рис. 4. Распределение гипоцентров афтершоков Спитакского землетрясения по глубинам.

На рис. 5 приведена проекция трехмерного распределения основных толчков и афтершоков.

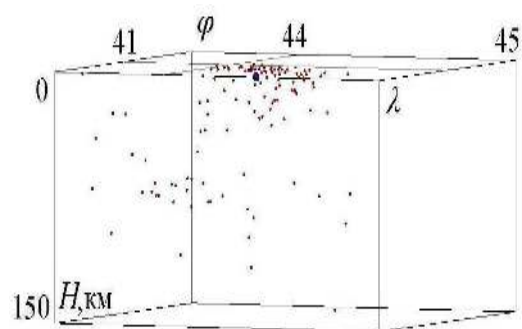


Рис. 5. Проекция трехмерного распределения основного толчка и афтершоков.

На рис. 6, взятом из работы [1], показаны положения эпицентра основного толчка СЗ по различным данным. На карту крестиком нанесено положение эпицентра в соответствии с нашим определением. Там же показаны выходы разрыва на поверхность.

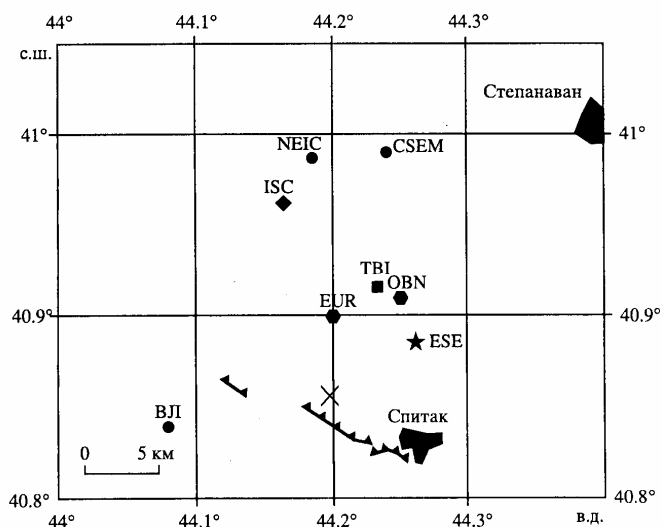


Рис. 6. Положения эпицентра основного толчка СЗ по различным данным [1].

Решение прямой кинематической задачи для глубоких источников показывает, что теоретические годографы хорошо ложатся на экспериментальные точки. Это говорит о том, что часть афтершоков действительно расположена на больших глубинах.

Таким образом, из рассмотрения полученных результатов можно сделать заключение, что афтершоковый процесс не такой компактный в пространстве, как это представляется по результатам, полученным ранее [1]. Этот процесс скорее похож на активизацию сейсмичности в регионе, кото-

рая охватывает достаточно большую область как по площади, так и по глубине, вплоть до 150 км для Спитакского землетрясения.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

<sup>2</sup>Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН РА  
e-mail:avet.andrey@mail.ru

**В. Ю. Бурмин, А. М. Аветисян**

### **Сравнительный анализ афтершокового процесса Спитакского землетрясения по наблюдениям близких станций**

На основе сейсмологических бюллетеней получено распределение гипоцентров афтершоков Спитакского землетрясения 1988 г. Показано, что помимо коровых афтершоков имеют место и мантийные афтершоки. Основная масса афтершоков Спитакского землетрясения расположена на глубинах от 0 до 90 км, есть отдельные события с глубиной до 150 км. Координаты гипоцентра основного толчка  $\varphi=40.867^\circ$  северной широты и  $\lambda=44.199^\circ$  восточной долготы, глубина очага  $H=5.0$  км.

**Վ. Յու. Բուրմին, Ա. Մ. Ավետիսյան**

### **Սպիտակի երկրաշարժի հետցնցումային պրոցեսների ուսումնասիրությունը մոտակա դիտակայանների տվյալներով**

Մեյամուլոգիական բյուլետենների տվյալների հիման վրա ստացվել է 1988 թվականի Սպիտակի երկրաշարժի հետցնցումների տարածական բաշխումը (հիպոկենտրոնի կոորդինատներ): Տույց է տրվել, որ, ի թիվս կեղևային հետցնցումների, գոյություն ունեն նաև մանտիայում տեղի ունեցած հետցնցումներ: Սպիտակի երկրաշարժի հետցնցումների հիմնական մասսան տեղաբաշխված է 0-ից մինչև 90 կմ, ոչ թե 0-25 կմ խորության վրա: Կան առանձին երկրաշարժեր, որոնց խորությունը հասնում է մինչև 150 կմ-ի: Հիպոկենտրոնի կոորդինատները: ըստ մեր տվյալների հավասար են  $\varphi=40.867^\circ$   $\lambda=44.199^\circ$ ,  $H=5.0$  կմ-ի:

**V. Yu. Burmin, A. M. Avetisyan**

### **Comparative Analysis of the Aftershock Process of Spitak Earthquake on Observations Close Stations**

On the basis of seismological bulletins the distribution of aftershock hypocentres of 1988 Spitak Earthquake is obtained. It is shown that besides crust aftershocks, mantle aftershocks are also observed. Most of the Spitak Earthquake aftershocks are situated in the depth of 0-90 km, certain cases are observed with the depth of 150 km. The coordinates of the hypocentre of the main shock are northern latitude  $\varphi=40.867^\circ$ , and eastern longitude  $\lambda=44.199^\circ$ , estimated depth is  $H=5.0$  km.

### **Литература**

1. *Арефьев С. С.* Эпицентральные сейсмические исследования. М. ИКЦ «Академкнига». 2003. 375 с.

2. *Арефьев С.С., Татевосян Р.Э., Парини И.Е. и др.* В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии. Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний. М. Наука. 1990. Вып. 31. С. 4-29.
3. *Годзиковская А. А., Геодакян Э. Г., Товмасян А. К.* В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии. Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний. М. Наука. 1990. Вып. 31. С. 29-35.
4. *Дуда С., Фастофф С., Кайзер Д.* - Изв АН СССР, Физика Земли. 1991. N 9. С. 27-38.
5. *Кондорская Н. В. Мкртчян М. Б., Лагова Н. А.* В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии. М. Наука. 1991. Вып. 32. С. 27-36.
6. *Кондорская Н. В., Вандышева Н. В., Захарова А.И., Саргсян Г. В., Чепкунас Л. С.* В кн.: Землетрясения в СССР в 1988 г. М. Наука. С. 60-74.
7. *Кондорская Н.В., Горбунова И.В.* - Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. N 5. С. 72-77.
8. *Кондорская Н. В., Саакян А. А.* – Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. N 8. С. 57-71.
9. В кн.: Научно-технический отчет «Спитакское землетрясение 7-го декабря 1988 г.» Института геофизики и инженерной сейсмологии АН АрмССР. Ленинакан. 1990. С. 7-10.
10. *Новикова Е.И., Раутиан Т. Г.* - Изв АН СССР. Физика Земли. 1991. N 12. С. 32-46.
11. В кн.: Сейсмологический бюллетень (ежедекадный). 1-10 декабря 1988 года. Обнинск. ИФЗ АН СССР. 1989. С. 22-57.
12. *Папалаивили В. Г., Саргсян Г. В., Агаларова Э. Б. и др.* В кн.: Землетрясения в СССР в 1988 г. М. Наука. 1991. С. 60-74.
13. *Рогожин Е.А., Рыбаков Л. Н., Борисов Б. А.* - ДАН СССР. Геология. Т. 311. N 2. 1990. С. 435-439.
14. Bulletin of the International Seismological Centre. 1988, December. V. 25.
15. In: Earthquake Data Report (EDR) U.S. Department of the Interior Geological Survey 12-88 part iof. 2. P. 50-55.
16. *Lee W.H., Lahr J.C.* In: HYPO-71 U.S. Geol. Surv. File Rept. 1972. P. 75-311.
17. *Pacheco J.F., Estabrokk C.H., Simpson D.W., Nabelek J.L.* Teleseismic body wave analysis of the 1988 Armenian earthquake. Geophys. Res. Lett. 1989. 13 p.
18. *Аветисян А. М., Бурмин В. Ю., Оганесян А. О., Казарян К.С.*- Изв. НАН РА. Науки о Земле. 2015. N 2. С. 31-41.
19. *Аветисян А. М., Бурмин В. Ю., Манукян А. Г.*- Изв. НАН РА. Науки о Земле. 2012. N 3. С. 70-77.
20. *Бурмин В. Ю., Аветисян А. М., Геворкян К. В.* В кн.: Геофизика XXI столетия. 2006 г. Сборник трудов 8-х геофизических чтений им. В. В. Федьнского. 2007. С. 326-330.
21. *Бурмин В. Ю., Шумлянская Л. А.* - Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. N 2. С. 5-16.
22. *Бурмин В. Ю.* - Вулканология и сейсмология. 1992. N 3. С.73-82.
23. *Бурмин В. Ю., Аветисян А. М., Геворкян К. В.* - Вулканология и сейсмология. 2004. N 1. С. 68-78.