

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9513

## РАЗРЯДКА СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БОЛЬШОГО КАВКАЗА

© 2017 М. А. Мкртчян

Институт Геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА,  
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Сарксяна, 5, e-mail: iges@sci.am

Проведен анализ пространственно-временно-энергетического распределения афтершоковых процессов Рачинского (29.04.1991 г.  $M = 7,0$ ), Барисахского (23.10.1992 г.  $M = 6,5$ ), Закаतालского (07.05.2012 г.  $M = 5,6$ ) сильных землетрясений, происшедших на южном склоне центральной части Большого Кавказа. В выделенных очаговых зонах на основе количественных оценок относительных деформаций выявлены характерные закономерности и особенности разрядки сеймотектонических напряжений.

На первом этапе проведен анализ пространственного распределения афтершоков. Применяя современный пакет программ GIS, построены карты афтершоковых областей этих землетрясений и оценены их площадные значения.

На втором этапе проведен временной анализ афтершоковых процессов. Для этой цели изучено затухание интенсивности афтершокового процесса во времени. С целью изучения разрядки сеймотектонических напряжений, был применён широко используемый в сейсмологической практике график Бенъофа, характеризующий высвобождение энергии сеймотектонических деформаций.

Разрядка сеймотектонических напряжений в очаговых зонах Рачинского и Барисахского землетрясений имеет крутой спад. На графике Закаतालского землетрясения наглядно наблюдаются три ступени. Эти особенности связаны с литологическим составом и стратиграфическими особенностями геологических сред очаговых зон этих землетрясений. В области молодой горно-складчатой структуры Большого Кавказа разрядка сеймотектонических напряжений происходит более интенсивно и в сравнительно коротком временном интервале, а в Закавказском позднеальпийском межгорном молассовом прогибе этот процесс имеет затяжной характер.

**Ключевые слова:** афтершок, основной толчок, магнитуда, эпицентры землетрясений, график Бенъофа.

На современном этапе сеймотектонических исследований общепризнанна приуроченность сейсмических очагов к определенным геологическим структурам, хотя связи тектоники и сейсмичности пока окончательно не установлены.

Сложились три независимых и непротиворечащих друг другу представления об этих связях, согласно которым, очаги сильных землетрясений расположены:

- а) в плоскостях крупных разломов;
- б) в дизъюнктивных узлах разных рангов;
- в) в объёмных средах различных геологических структур.

Общим условием всех трех представлений является наличие накопленного в них напряжения. Последнее представление обосновывается тем обстоятельством, что все сильные землетрясения сопровождаются афтершоками, пространственные распределения которых в зоне разрыва формируют, как правило, сейсмогенный объем. Пространственное распределение очагов сильных землетрясений Тавро-Кавказского региона, имеющего сложное строение сеймотектонических структур, указывает на наличие в нем всех трех вышеуказанных представлений.

Как правило, все сильные землетрясения сопровождаются афтершоковыми процессами, которые, согласно закону Омори, имеют пространственно-временные закономерности, связанные с накоплением и перераспределением напряжений в очаговых зонах.

Закон Омори, являющийся одним из наиболее обоснованных законов сейсмологии, определяет, что убывание количества афтершоков в единицу времени, происходит в степенной зависимости [Omori, 1894]:

$$N(t) = \frac{A}{(t + c)^p} \quad (1)$$

где  $A$ ,  $p$ ,  $c$  – постоянные;  $p$  для различных землетрясений изменяется в пределах 0,8-1,5. При  $p = 1$  выражение (1) представляет собой гиперболу Омори. В работе [Шебалин, 2004] указывается, что степенная зависимость характерна для многих критических явлений, аналогичных фазовым переходам, происходящим в сложных системах, часто характеризующихся как детерминистский хаос. Нелинейный характер процесса разрывообразования хорошо отражается в афтершоках, различные характеристики которых дают возможность оценить напряженное состояние этих структур. Именно этим обусловлен большой интерес многих исследователей к изучению афтершоковых процессов, позволяющих оценить напряженное состояние геологических структур в очаговых зонах. Аномально большое количество афтершоков от землетрясений средней силы вместе с другими аномальными проявлениями группирования сейсмических событий могут являться предвестниками сильных землетрясений [Шебалин, 2004].

Детальное исследование закона Омори, проведенное Шебалиным и др. [Holschneider et al., 2012], позволило выявить, что этот закон не всегда выполняется или его выполнение ограничено определенными временными и магнитудными рамками.

С их стороны предложен модифицированный вариант закона Омори [Holschneider et al., 2012]:

$$\lambda_{(t)} = \frac{K}{(t + c)^p} \quad (2)$$

где  $\lambda$  – частота афтершоков в заданном временном интервале;

$t$  – время возникновения основного толчка;

$K$  – эффективность афтершоковой последовательности;

$p$  – коэффициент затухания;

$c$  – временная задержка, согласно которой выражение (1), характеризующее затухание интенсивности афтершокового процесса, целесообразно аппроксимировать тремя фазами. Первая фаза, которая соответствует начальному периоду афтершокового процесса (первые дни), характеризует напряженно-деформационное состояние разлома и хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Вторая фаза в основном отражает физико-механическое состояние геологической среды и аппроксимируется гиперболической зависимостью. Третья фаза, это стадия релаксации тектонических напряжений в очаговой зоне и аппроксимируется экспоненциальной зависимостью.

С нашей стороны поставлена задача использовать данный подход для пространственно-временного изучения афтершоковых процессов трех сильных (Рачинского 29.04.1991 г.  $M = 7,0$ , Барисахского 23.10.1992 г.  $M = 6,5$ , Закатальского 07.05.2012 г.

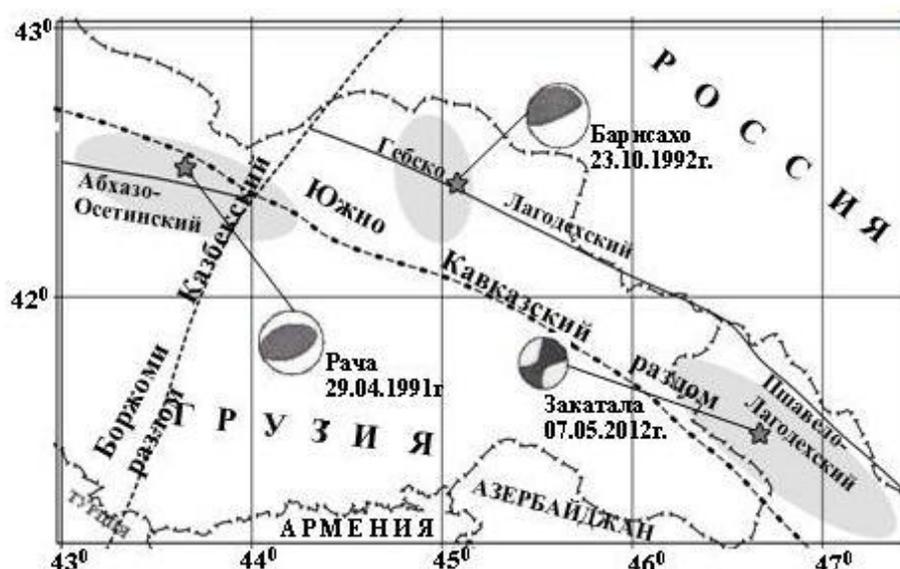


Рис. 1. Пространственное распределение афтершоковых зон сильных землетрясений, с фокальным механизмом и основные геолого-тектонические элементы в районе исследований

М = 5,6) землетрясений, возникших на южном склоне центральной части Большого Кавказа, с целью изучения разрядки сеймотектонических напряжений в очаговых зонах этих землетрясений.

В геотектоническом плане эпицентральные области этих землетрясений расположены на стыке двух главнейших структурных единиц Кавказа — молодой горно-складчатой структуры Большого Кавказа и Закавказского срединного массива [Шенгелая и др., 1995].

В исследуемой области расположены главнейшие глубинные разломы первого ранга – Южно-Кавказский и Боржоми-Казбекский, а также Абхазо-Осетинский, Гебско-Лагодехский и Пшавело-Лагодехский разломы более низкого ранга, на которых соответственно расположены очаги Рачинского, Барисахского и Закатальского землетрясений. Сеймотектонические подвижки в этой области обусловлены наличием в ней региональных субмеридионального направления сжимающих напряжений, которые хорошо отражают механизмы очагов этих землетрясений.

Механизмы очагов этих землетрясений представлены на рисунке 1 в проекции нижней полусферы, согласно которым в очаге Рачинского землетрясения имела место взбросовая подвижка, а обе нодальные плоскости имеют северо-западное простирание, одна из них – пологая, другая – крутая. Подвижки по обеим плоскостям представлены взбросами. При таком механизме подвижек должна образоваться структура в виде грабена или горста, в зависимости от подвижки составных блоков [Шенгелая и др., 1995].

Механизм очага Барисахского землетрясения указывает, что в очаге имели место взбросо-сдвиговые подвижки. Одна из нодальных плоскостей имеет север-северо-западное простирание с углом падения  $13^\circ$ , вторая нодальная плоскость имеет северо-западное направление с углом падения  $83^\circ$  (neic.usgs.gov).

Механизм очага Закатальского землетрясения указывает, что в нем происходила правосторонняя сдвиговая подвижка с характеристиками динамики по нодальным плоскостям подобно при Барисахском землетрясении. Нодальные плоскости имеют

Таблица 1.

**Основные динамические параметры Рачинского, Барисахского и  
Закатальского землетрясений**

№	Наз. земл.	Врем. воз. земл.	$\varphi$	$\lambda$	M	$E_{\text{осн.толч.}}$	L [2] (км)	$M_0$ (дин/см)	$\Delta\sigma$ [7] (бар)
1	Рача 29.04.1991 г.	9:12	42,49	43,65	7,0	3E+16	55,72	3,34E+26	2E+01
2	Барисахо 23.10.1992 г.	23:19	42,43	45,08	6,5	5E+15	30,34	4,93E+25	2E+01
3	Закатала 07.05.2012 г.	4:40	41,50	46,67	5,6	1.2E+14	14,93	3E+01	

Таблица 2.

**Характерные значения афтершоковых процессов Рачинского,  
Барисахского и Закатальского землетрясений**

№	Наз. земл.	$M_{\text{сил. аф}}$	$N_{\text{аф}}$	$T_{\text{прод.аф}}$ суток	$\Sigma E_{\text{аф}}$	$E/\Sigma E_{\text{аф}}$ (%)	S (км <sup>2</sup> )	V (км <sup>3</sup> )	$\gamma$	A	c	p
1	Рача 29.04.1991 г.	6,2	876	961	3,4E+15	11	2000	20000	0,6	615	0,3	0,83
2	Барисахо 23.10.1992 г.	5,5	142	824	2,2E+14	5,5	1425	47025	0,7	142	0,1	0,95
3	Закатала 07.05.2012 г.	5,5	62	319	1,4E+14	117	3220	32200	0,69	53	0,3	1,2

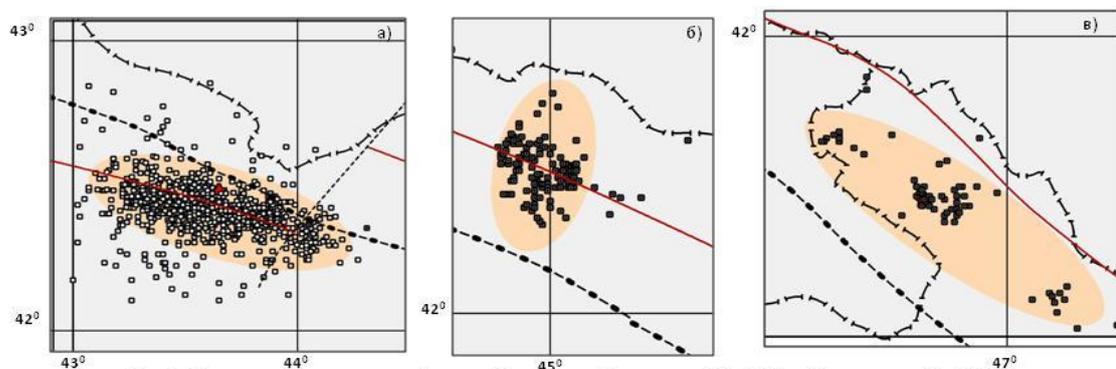


Рис. 2. Пространственное распределение афтершоков Рачинского 29.04.1991 г., Барисахского 23.10.1992 г., Закатальского 07.05.2012 г. землетрясений.

соответственно север-северо-западное направление с углами падения  $8^\circ$  и  $82^\circ$  и по ним происходит взброс-сдвиговая подвижка ([www.emsc.org](http://www.emsc.org)).

Количественные значения основных динамических параметров очагов этих землетрясений приведены в таблице 1.

Из региональных каталогов землетрясений, ([www.emsc.org](http://www.emsc.org)) методом «пространственно-временного окна» Кнопова [Gardner, Knopoff, 1974], выделены афтершоки и определены продолжительности афтершоковых процессов этих землетрясений.

Количественные значения параметров афтершоковых процессов приведены в таблице 2.

На первом этапе проведен анализ пространственного распределения афтершоков. С помощью современного пакета программ GIS, построены карты афтершоковых областей этих землетрясений и оценены их площадные значения (рис. 2).

Анализ пространственного распределения указывает, что афтершоковая область Барисахского землетрясения имеет близкруговой вид, а афтершоковое поле Рачинского землетрясения представляет собой эллипсоид, большая ось которого имеет близширотное направление. Эпицентр главного толчка Рачинского землетрясения расположен в центре выделенного эллипсоида, а Барисахского землетрясения смещён в восточную окраинную часть афтершокового поля. Особый интерес представляет картина афтершокового поля Закатальского землетрясения. Как видно из рисунка 2, оно имеет северо-западное – юго-восточное простирание, и выделяется тремя группирующимися областями. В отличие от Рачинского и Барисахского землетрясений, Закатальское землетрясение имеет 2 сильнейших афтершока, магнитуды которых ( $M = 5,5$ ;  $M = 5,4$ ) близки к магнитуде основного толчка. Эпицентры основного толчка и одного из сильнейших афтершоков расположены в центральной части афтершокового поля, второй сильнейший афтершок произошёл в северной части и формировал вторую, более маленькую афтершоковую зону. Количественные значения площадей афтершоковых полей этих землетрясений приведены в таблице 2.

Следует отметить, что площади афтершоковых полей Рачинского и Барисахского землетрясений соизмеримы со среднемировыми данными, имеющими соответствующие магнитуды. От этих данных существенно отличается значение площади афтершокового поля Закатальского землетрясения. Если отдельно рассмотреть афтершоковое поле основного толчка и первого сильнейшего афтершока, то площадь составляет  $628 \text{ км}^2$ . Если к нему добавить площади афтершокового поля второго сильнейшего афтершока и южного сегмента, то общая площадь составит  $3220 \text{ км}^2$ .

Используя средние значения глубин залегания афтершоков, рассчитаны также сейсмогенные объёмы афтершоковых областей, значения которых приведены в таблице 2, рассчитаны также графики повторяемости афтершоковых процессов каждого из этих землетрясений, которые отличаются от регионального значения  $\gamma = 0,5$  на величину  $0,1 \div 0,2$ . Используя выражение (3)

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{\left(\frac{S}{\pi}\right)^{3/2}}, \quad (3)$$

где  $M_0$  – сейсмический момент,

$S$  – площадка поверхности разрыва,

рассчитаны значения сброшенных напряжений при основных толчках этих землетрясений [Kanamori, Anderson, 1975]. Рассчитаны также значения высвобожденной сейсмической энергии, как при основных толчках, так и при афтершоковых процессах [Аптекман и др., 1989]. Проведен сопоставительный анализ этих значений, который показывает, что суммарные значения высвобожденных сейсмических энергий при афтершоковых процессах Рачинского и Барисахского землетрясений соответственно составляют всего 7,5% и 4%, от значений высвобожденных сейсмических энергий основных толчков. Особый интерес представляет значение вы-

свобожденной сейсмической энергии при афтершоковом процессе Закаतालского землетрясения, который составляет 120%, от значения высвобожденной сейсмической энергии при основном толчке. Это связано с наличием при Закаतालском землетрясении двух сильнейших афтершоков с магнитудами  $M=5,3$  и  $M=5,5$ . Учитывая небольшие магнитудные отклонения двух сильнейших афтершоков от значения магнитуды основного толчка, а также вышеописанные особенности проявления афтершокового поля Закаतालского землетрясения, можно прийти к выводу, что в очаговой зоне Закаतालского землетрясения имело место, впервые сформулированное Викулиным, так называемое спарение или «дуплет» землетрясения [Викулин, 2008].

На втором этапе проведен временной анализ афтершоковых процессов. Для этой цели изучено затухание интенсивности афтершокового процесса во времени. Построены графики зависимости изменения интенсивности проявления афтершоков во временных интервалах соответственно равных для Рачинского землетрясения 5, 100, 900 дням, Барисахского землетрясения 5, 100, 700 дням и Закаतालского землетрясения 2, 100, 600 дням (рис. 3) (1, 2, 3).

Из графиков зависимости наглядно видно, что при Рачинском и Барисахском землетрясениях затухания афтершоковых процессов в течение первых 5 дней, а при Закаतालском землетрясении в первые 2 дня хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. Во временном интервале в 100 дней затухания аппроксимируются гиперболической зависимостью, а окончательное затухание происходит во временном интервале, соответственно, для Рачинского землетрясения 900 дней, Барисахского землетрясения 700 дней, Закаतालского землетрясения 600 дней и хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Полученные результаты анализов указывают, что процессы затухания интенсивностей афтершоков во времени хорошо согласуются с модифицированным вариантом закона Омори [Шебалин, 2004; Holschneider et al., 2012].

С целью изучения разрядки сейсмотектонических напряжений, был применён широко используемый в сейсмологической практике график Беньофа, характеризующий высвобождение энергии сейсмотектонических деформаций. Модель очага Беньофа основывается на том, что энергия деформации  $E_D$ , накопленная в горных породах в процессе деформирования среды, во время землетрясения преобразуется в энергию сейсмических волн  $E$ :

$$E = E_D = \frac{1}{2} \mu \varepsilon^2 V \quad (4)$$

где  $\mu$  – упругая константа,  
 $\varepsilon$  – высвобожденная деформация;  
 $V$  – объем очага.  
 Следовательно:

$$\varepsilon = c \cdot E^{1/2},$$

где

$$c = \left( \frac{1}{2\mu V} \right)^{-1/2}.$$

Отсюда корень квадратный из энергии землетрясения пропорционален высвобожденной упругой деформации. Соответственно, при последовательности толч-

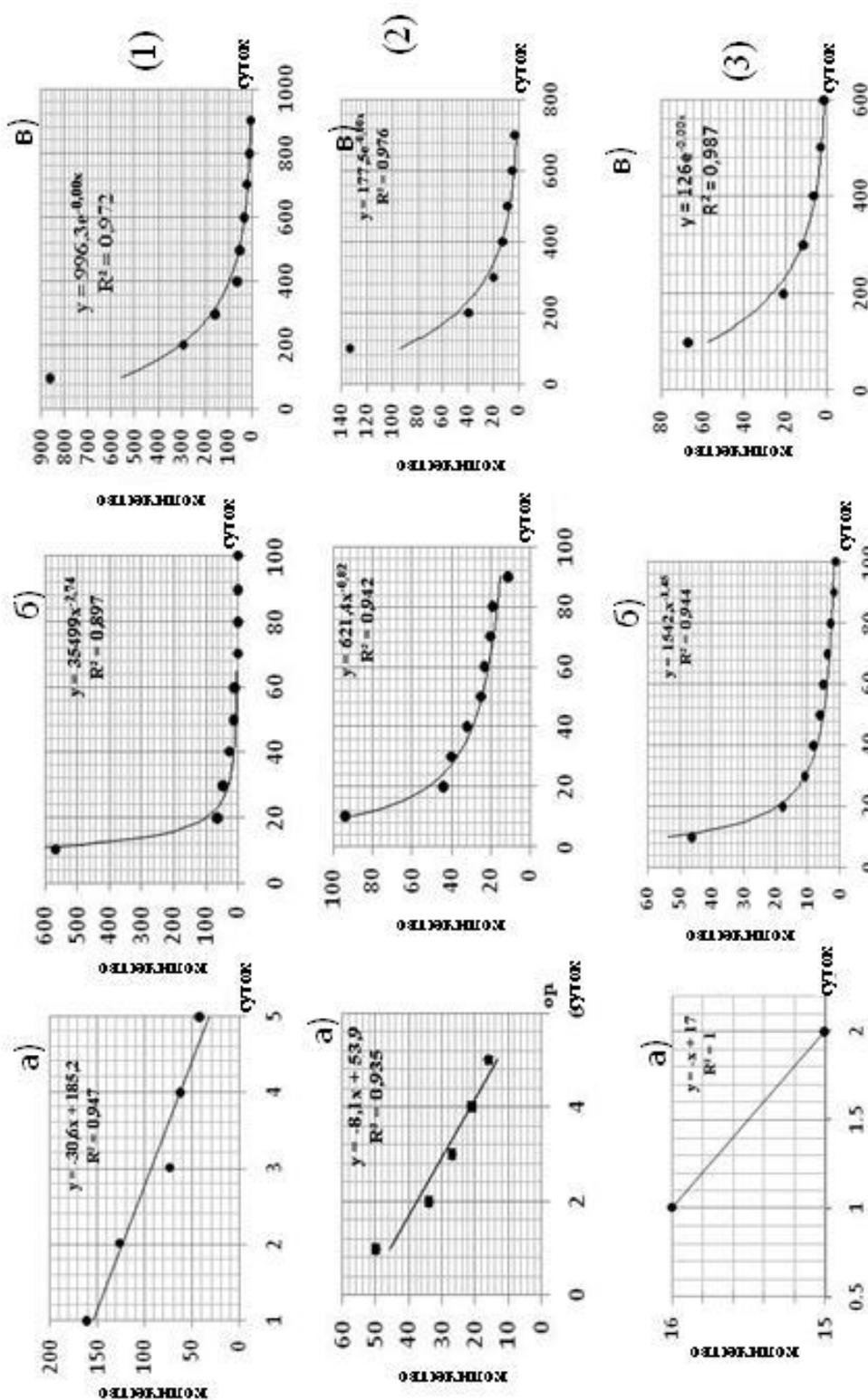


Рис. 3. Характеризующие кривые затухания афтершокового процесса  
 (1) Рачинского 29.04.1991 г. землетрясения для а) 5 суток, б) 100 суток, в) 900 суток,  
 (2) Барисахского 23.10.1992 г. землетрясения для а) 5 суток, б) 100 суток, в) 700 суток,  
 (3) Закавказского 07.05.2012 г. землетрясения для а) 2 суток, б) 100 суток, в) 600 суток

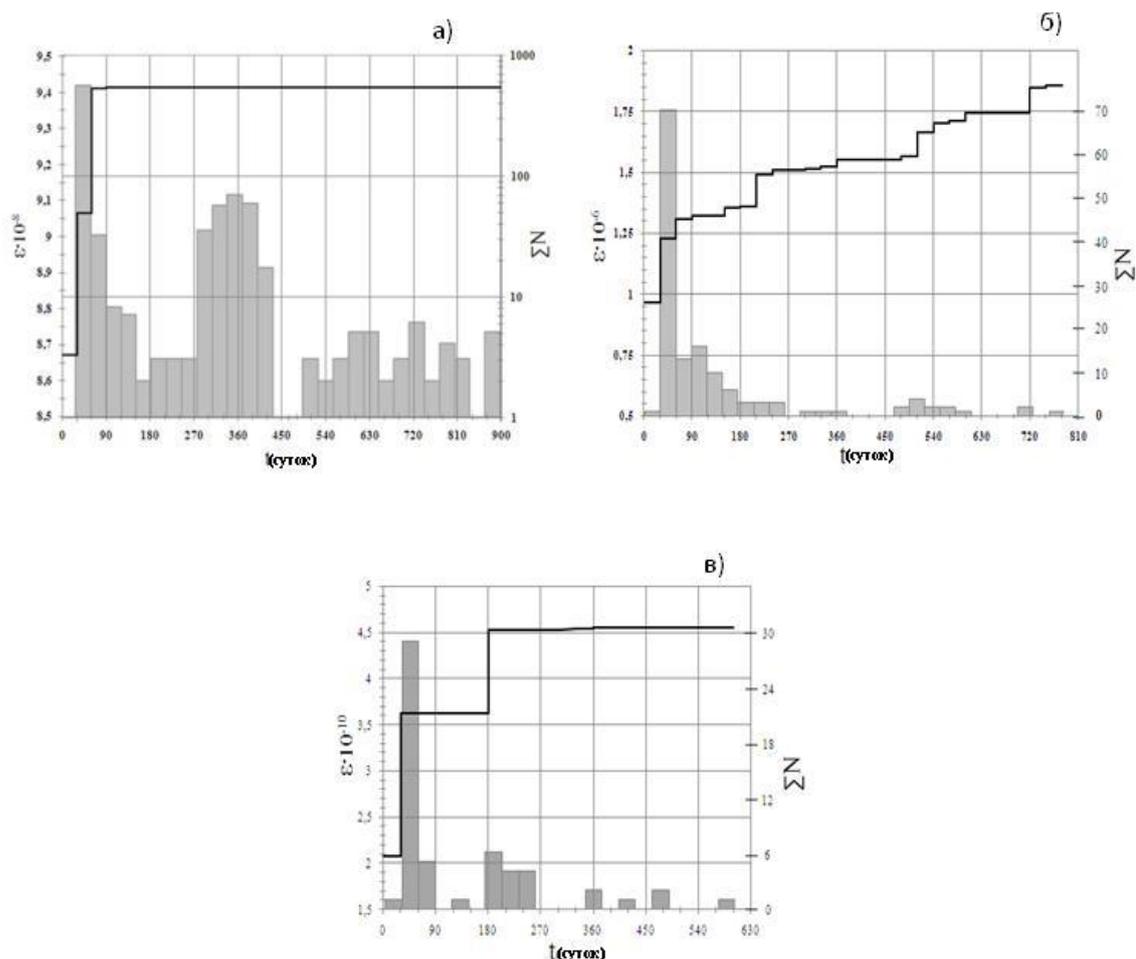


Рис. 4. Сопоставление кумулятивных графиков Бенъофа, изображающих относительные деформации Рачинского (а) 29.04.1991 г., Барисахского (б) 23.10.1992 г. и Закатальского (в) 07.05.2012 г. землетрясений с количеством афтершоков (по суткам)

ков график зависимости накопленной суммы приращений  $E^{1/2}$  от времени  $t$  представляет собой характеристику высвобождения упругих деформаций в фокальной зоне [Солоненко Н., Солоненко А., 1987].

Были построены вышеуказанные графики Бенъофа для Рачинского, Барисахского, Закатальского землетрясений (рис. 4).

При построении этих графиков временной шаг был принят равным 30 дням.

Как видно из графиков, разрядка сейсмостектонических напряжений в очаговых зонах Рачинского и Барисахского землетрясений имеет крутой спад, притом основные части разрядки сейсмостектонических напряжений этих землетрясений происходили соответственно в течение 90 и 60 дней. В отличие от них, на графике Закатальского землетрясения (рис. 4в) наглядно наблюдаются три ступени. Эти особенности связаны с литологическим составом и стратиграфическими особенностями геологических сред очаговых зон этих землетрясений. В области молодой горно-складчатой структуры Большого Кавказа разрядка сейсмостектонических напряжений происходит более интенсивно и в сравнительно коротком временном интервале, а в Закавказском позднеальпийском межгорном молассовом прогибе этот процесс имеет затяжной характер.

### Литература

1. Аптекман Ж. Я., Белавина Ю. Ф., Захарова А. И. и др. Спектры *P*-волн определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – №2. – С. 76-79.
2. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика // Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. – 463 с.
3. Ризниченко Ю. В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 405 с.
4. Солоненко Н. В., Солоненко А. В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Новосибирск: Наука, сибирское отделение, 1987. – 93 с.
5. Шебалин П. Н. Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 398. №2. – С. 249-254.
6. Шенгелая Г. Ш., Папалашвили В. Г., Махарадзе Р. К. и др. Первый каталог землетрясений Кавказа, составленный по программе «ГИПОЦЕНТРИЯ-ГМ» и некоторые вопросы современной геодинамики эпицентральной зоны Рача-Имеретинского землетрясения. – Тбилиси: изд. «МЕЦНИЕРЕБА», 1995. – 129 с.
7. Gardner J., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in S. California with aftershocks removed Poissonian? Yes // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 1974. – Vol. 64. №5. – P. 1363-1367.
8. Holschneider M., Narteau C., Shebalin P., Peng Z., Schorlemmer D. Bayesian analysis of the modified Omori law // Journal of Geophysical Research. – 2012. – Vol. 117, BXXXXX, doi:10.1029/2011JB009054.
9. Kanamori B. H., Anderson D. L. The oretical basis of some empirical relations in seismology // Bull. of the Seismol. Soc. of Amer. – 1975. – Vol. 65. №.5. – Pp. 1073-1095.
10. Omori F. On aftershock of earthquakes // J. Coll. Sci. Univ. – Tokyo. –1894. – V. 7 – P. 111-200.

DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9513

## DISCHARGE OF SEISMOTTONTONIC VOLTAGES IN THE FOCAL ZONES OF STRONG EARTHQUAKES OF THE CENTRAL PART OF THE GREAT CAUCASUS

© 2017 M. A. Mkrtchyan

Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,  
Republic of Armenia, 3115, Gyumri, V. Sarksyan Str., 5, e-mail: iges@mail.ru

Aftershock process spatio-temporal-energy distribution analysis was made on Racha (29.04.1991  $M = 7,0$ ), Barisaho (23.10.1992  $M = 6,5$ ), Zakatala (07.05.2012  $M = 5,6$ ) earthquakes occurred on the southern slope of

the central part of the Greater Caucasus. On the identified focal areas on the basis of quantitative estimates of the relative deformation characteristic regularities and features of seismotectonic stress release are identified.

At the first stage, an analysis of the spatial distribution of aftershocks was carried out. Applying the modern software package GIS, maps of aftershock areas of these earthquakes are constructed and their area values are estimated.

At the second stage, a temporary analysis of aftershock processes was performed. For this purpose, the attenuation of the intensity of the aftershock process in time was studied. In order to study the discharge of seismotectonic stresses, Benyoff's graph, which characterizes the release of the energy of seismotectonic deformations, was widely used in seismological practice.

Discharge of seismotectonic stresses in the focal zones of the Rachin and Barisakh earthquakes has a steep decline. On the graph of the Zakatala earthquake three stages are visually observed. These features are associated with the lithological composition and stratigraphic features of the geological environments of the focal zones of these earthquakes. In the area of the young mountain-fold structure of the Greater Caucasus, seismotectonic stresses are depleted more intensively and in a relatively short time interval, and in the Transcaucasian Late Alpine intermountain molasses trough this process has a protracted character.

**Keywords:** aftershock, the main shock, magnitude, hypocenter, Benyoph's schedule.

### References

1. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zaharova A.I. i dr. Spektry P-voln opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Perehod ot stacionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskikh parametrov ochaga [Spectra of P-waves to determine the dynamic parameters of earthquake foci. The transition from the station spectrum to the focal plane and the calculation of the dynamic parameters of the source]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 1989, No. 2, pp. 76–79. (in Russian).
2. Vikulin A.V. *Fizika Zemli i geodinamika* [Physics of the Earth and geodynamics]. Petropavlovsk-Kamchatskij, Izd-vo KamGU named after Vitus Bering, 2008. 463 p. (in Russian).
3. Riznichenko Yu.V. *Izbrannye trudy. Problemy seismologii* [Selected works. Problems of seismology]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 405 p. (in Russian).
4. Solonenko N.V., Solonenko A.V. Aftershokovye posledovatel'nosti i roi zemletryasenij v Bajkals'koj riftovoj zone [Aftershock sequences and swarms of earthquakes in the Baikal rift zone]. Novosibirsk, Nauka, sibirskoe otdelenie, 1987. 93 p. (in Russian).
5. Shebalin P.N. Aftershoki kak indikator napryazhennogo sostoyaniya v sisteme razlomov [Aftershocks as indicators of stress in the fault system]. *Doklady akademii nauk*, 2004, Vol. 398, No. 2, pp. 249–254. (in Russian).
6. Shengelaya G.Sh., Papalashvili V.G., Maharadze R.K. et al. Pervyj katalog zemletryasenij Kavkaza, sostavlennij po programme «GIPOCENTRIYA-GM» i nekotorye voprosy sovremennoj geodinamiki epicentral'noj zony Racha-Imeretinskogo zemletryaseniya [The first catalog of earthquakes in the Caucasus, compiled according to the program "HYPOCENTREY-GM" and some questions of modern geodynamics of the epicentral zone of the Racha-Imereti earthquake]. Tbilisi, Mecniereba Publ., 1995. 129 p. (in Russian).
7. Gardner J., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in S. California with aftershocks removed Poissonian? Yes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1974, Vol. 64, No. 5, pp. 1363–1367.
8. Holschneider M., Narteau C., Shebalin P., Peng Z., Schorlemmer D. Bayesian analysis of the modified Omori law. *Journal of Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, BXXXXX, doi:10.1029/2011JB009054.
9. Kanamori B.H., Anderson D. L. The oretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. of the Seismol. Soc. of Amer.*, 1975, Vol. 65, No. 5, pp. 1073–1095.
10. Omori F. On aftershock of earthquakes. *J. Coll. Sci. Univ*, 1894, Vol. 7, pp. 111–200.