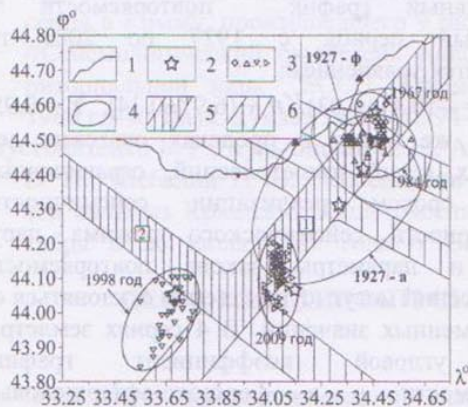


## НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА

Рассмотрены пространственно-временные свойства форшок-афтершоковых последовательностей землетрясений Крыма, в частности, выполнение законов Омори и Гутенберга-Рихтера.

**Ключевые слова:** землетрясение; афтершок; группируемость; закон Омори; закон повторяемости.

**Тектоническая позиция очаговых зон.** По степени группируемости землетрясений Крымского сейсмоактивного региона центральная его часть относится к наиболее сложным и неоднородным. В соответствии с классификацией Моги [Mogi, 1963] в центральной зоне часто возникают группы взаимосвязанных землетрясений типа I и II: форшоки – главный толчок – афтершоки. В краевых зонах региона происходят преимущественно одноактные сейсмические события [Каменобродский, Пустовитенко, 1982]. За период инструментальных наблюдений в центральной зоне Крыма отмечено более 20 групп последовательностей землетрясений, наиболее сложные из которых произошли в 1927, 1967, 1984, 1998 и 2009 гг. [Пустовитенко и др., 1976; Пустовитенко, 1984, 2004; Pustovitenko et al, 1988; Пустовитенко, Поречнова, 2011]. Основные параметры главных толчков, выбранных для анализа последовательностей даны в табл. 1.



**Рис. 1.** Пространственное положение очаговых зон связанных землетрясений центральной зоны Крыма

1–береговая линия; 2–эпицентры главных толчков; 3–форшоки и афтершоки связанных событий (разные значки относятся к разным землетрясениям); 4–контуры очаговых зон; 5, 6–сейсмогенерирующие структуры с  $M_{\max}=7.0$ ; (1–Южно-Бережная; 2–Одесско-Синопская) и с  $M_{\max}=6.5$  по работе [Пустовитенко и др., 1999].

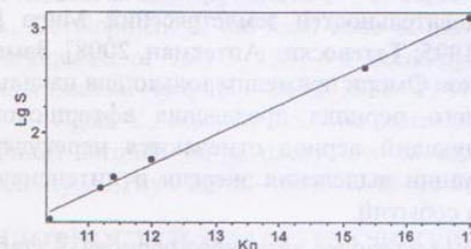
Очаговые зоны рассматриваемых землетрясений приурочены к узлам пересечения основных сейсмогенерирующих структур Крыма 1 порядка с  $M_{\max}=7.0$  (Южно-Бережной и Одесско-Синопской) с другими крупными тектоническими структурами 2 порядка с  $M_{\max}=6-6.5$  (рис.1).

Все они возникли в пределах земной коры ( $h=15-32$ км) района наибольшего градиента изобат континентального склона Черного моря.

Эпицентральные зоны связанных землетрясений можно представить в виде эллипсов, большие оси которых ориентированны в разных направлениях вдоль соответствующих тектонических структур (рис. 1).

**Размеры очаговых зон.** Наибольшие размеры очаговых зон получены для афтершоков разрушительного землетрясения 11.09.1927 г. с  $M=6.8$  и для афтершоков форшока 26.06.1927 г. с  $M=6.0$  (на рис.1 отмечены как 1927-а и 1927-ф, соответственно), а наименьшие – для последовательности 1967 г. с  $M=3.1$ . В целом с увеличением энергетического уровня ( $Kn$ ) главных толчков площади очаговых зон  $S$  линейно возрастают (рис.2) и этот рост аналитически выражен уравнением прямой, полученной методом ортогональной регрессии:

$$\lg S = (0.28 \pm 0.01)Kn - (1.71 \pm 0.13), \quad r = 0.98$$



**Рис. 2.** Зависимость площади очаговых зон землетрясений Крыма от энергии главного толчка

**Закон Омори.** Афтершоки являются отражением релаксационных процессов в области очага главного события, которые проявляются в уменьшении интенсивности потока афтершоков во времени по степенному закону – по закону Омори [Omori, 1894]. Временной ход числа афтершоков  $N$ , происходящих в определенный интервал времени  $T$  можно описать уравнением прямой в двойном логарифмическом масштабе:

$\lg N = -p \lg T + b$ , где  $p$  – скорость изменения интенсивности потока событий.

Для рассмотренных последовательностей Крыма подобные уравнения получены с высоким коэффициентом корреляции  $r > 0.8$ . Пример выполнения закона Омори дан на рис. 3 для афтершоков землетрясения 2009 г. Результаты оценки параметра  $p$  представлены в табл. 2.



Основные параметры главных толчков сложных последовательностей

Дата			Время в очаге			Координаты гипоцентра			K <sub>н</sub>	M <sub>ЛН</sub> (M <sub>W</sub> )
г	м	д	ч	м	с	φ°	λ°	h, км		
1927	09	11	22	15	48	44.3	34.3	17	16.8	6.8(6.9)
1967	07	09	12	59	22	44.58	34.46	15	10.4	3.1(3.7)
1984	07	05	03	07	17	44.49	34.46	18	11.4	3.7(4.3)
1998	10	18	05	22	10	44.05	33.68	22	12.0	4.3(4.5)
2009	04	12	16	31	40	44.06	34.14	32	11.2	4.0(4.3)

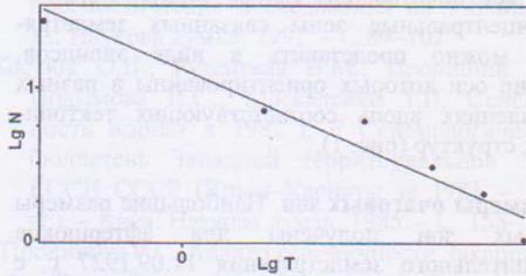


Рис. 3. Изменение числа афтершоков землетрясения 2009 г. со временем. Отсчет от момента главного землетрясения. Суммирование в интервале  $dT = 1$  сутки

Как видно из табл. 2., коэффициент спада со временем потока повторных событий  $p$  составил от 0.78 до 1.29 (при среднем значении  $p = 1.04 \pm 0.15$ ), что находится в пределах преобладающего значения  $p = 1$  для большинства афтершоковых последовательностей землетрясений Мира [Utsu et al, 1995; Татевосян, Аптекман, 2008]. Заметим, что закон Омори применим только для начального активного периода проявления афтершоков. В последующий период отмечаются нерегулярные флуктуации выделения энергии и интенсивности потока событий.

Время наиболее активного периода  $T$  (табл. 2) для всех событий получилось разным и не связанным с энергией главного толчка. В то же время с ростом  $T$  коэффициент  $p$  уменьшается. Эта обратная зависимость выражена уравнением:

$$\lg p = -(0.18 \pm 0.04) \lg T + (0.23 \pm 0.05), \quad r = 0.93$$

Можно также отметить тенденцию увеличения значения коэффициента  $p$  с возрастанием глубины очага главного толчка.

Таблица 2

Сравнительные характеристики сложных последовательностей землетрясений

Дата	$\gamma$	$T$ , сутки	$p$
1927	$0.32 \pm 0.02$	20	$0.96 \pm 0.16$
1967	$0.60 \pm 0.01$	80	$0.78 \pm 0.06$
1984	$0.38 \pm 0.01$	14	$1.0 \pm 0.26$
1998	$0.28 \pm 0.02$	10	$1.26 \pm 0.46$
2009	$0.37 \pm 0.04$	6	$1.19 \pm 0.14$

Изменение величины сброса энергии со временем отражает общие физические процессы разгрузки очаговой зоны и релаксации среды в окрестности очага. В начальный период наблюдается быстрый спад энергии и числа афтершоков, в конце серии энергия повторных толчков меняется медленно, а их количество сокращается вплоть до полного исчезновения.

**Сейсмический режим.** Наиболее важный параметр для анализа изменения свойств очаговой зоны является закон Гутенберга-Рихтера или график повторяемости, характеризующий дробность глубины среды [Ризниченко, 1985]. Для больших временных интервалов сейсмический режим близок к стационарному. Для центральной зоны Крымского региона, где произошли рассматриваемые серии землетрясений кумулятивный график повторяемости за длительный период с 1927 по 2009 гг. описывается уравнением:

$$\lg N = -(0.41 \pm 0.03) K n + (6.97 \pm 0.34), \quad r = 0.95$$

В то же время в пределах очаговых зон связанных серий землетрясений, ограниченных малым сроком реализации сейсмичности, стационарность сейсмического режима нарушается и параметры закона повторяемости землетрясений могут существенно отклоняться от долговременных значений. В 4 сериях землетрясений угловой коэффициент графика повторяемости  $\gamma$  в форшоко-афтершоковый период оказался заниженным и только для последовательности 1967г. – завышенным (табл.2).

Причина уменьшения значения  $\gamma$  в зоне сложных последовательностей может быть объяснена локализацией и увеличением объемного разрушения среды вдоль поверхности главного разрыва, когда среда становится более податливой для распространяющихся крупных трещин. Повышенное же значение  $\gamma$  в афтершоковый период землетрясения 1967г. может быть объяснено наличием в очаговой зоне мелких разрывов и неоднородностей, высокой дробностью среды. Процесс выделения энергии в 1967 г. был сложным: за каждым сравнительно сильным афтершоком появлялся свой слабопадающий шлейф повторных толчков, что позволяет отнести данную последовательность к мультиплетным. Возможно, это обстоятельство растяну-



ло афтершоковый период на несколько месяцев [Пустовитенко, 1984].

**Заклучение.** Изученные сложные последовательности землетрясений центральной зоны Крымского региона обладают некоторыми общими свойствами:

в начальный период разгрузки очаговой зоны число сейсмических событий в единицу времени уменьшается по закону Омори;

скорость изменения интенсивности потока афтершоков обратно пропорциональна времени начального активного периода;

закон повторяемости землетрясений в очаговых зонах отклоняется от стационарного долговременного;

площади очаговых зон прямо связаны с энергией землетрясений;

В то же время каждая последовательность имеет свои отличительные особенности, связанные с физико-механическими свойствами среды в зоне накопления и сброса энергии.

#### Литература

- Каменобродский А. Г., Пустовитенко Б. Г. Особенности группирования землетрясений Крымско-Черноморского региона // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1982.— № 11.— С. 25–32.
- Пустовитенко Б. Г. Особенности проявления афтершоковой последовательности землетрясения в Крыму, произошедшего 9 июля 1967 г // Сейсмологический бюллетень западной территориальной зоны ЕССН (Крым-Карпаты, 1980 г.)—К: Наук. думка, 1984.— С. 94—100.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Аверьянова В. И., Шебалин Н. В. Особенности очаговых зон сильных Крымских землетрясений 11 сентября и 26 июля 1927 года // Вопр. инж.

Сейсмологии;— Вып. 18.— М.: Наука, 1976.— С. 103–114.

- Пустовитенко Б. Г. Форосское землетрясение 18 октября 1998 года  $M_c=4.4$ ;  $M_w=4.9$ ,  $I_0=5$  баллов (Крым) // Землетрясения Северной Евразии.—Обнинск: ГС РАН, 2004.—С. 240–248.
- Пустовитенко Б. Г., Поречнова Е. И. Пространственно-временные свойства сейсмического процесса в очаговой зоне ощутимого землетрясения в Крыму 12 апреля 2009г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. — Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011.—С. 24–34.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Борисенко Л. С., Поречнова Е. И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофиз. журнал.— 1999— №6 — Т.21.—С. 3–15.
- Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. — М.: Наука, 1985.— 408 с.
- Татевосян Р. Э., Аптекман Ж. Я. Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений Мира // Физика Земли — 2008.— №12.—С. 3–23.
- Mogi K. Some discussions on aftershock, foreshock and earthquake swarm — the fracture of a some-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena.—Bull. of the earthquakes. Res. Inst. Univ of Tokyo. Voll 41. Part 3. —1963— P. 615–640.
- Omori F. On aftershock of earthquakes // J. Coll. Sci. Univ. Tokyo. —1894.—V.7— P.111–200.
- Pustovitenko B. G., Kapitanova S. A., Panteleeva T. A. Development of the focal zone of the Crimea earthquake of July 5, 1984 // Proceedings of the XXI General Assembly -Sofia. 1988— P. 415–426.
- Utsu T., Ogata Y., Matura R.S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // J.Phys. Earth.—1995.—V.43—P. 1–33.

## ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ СКЛАДНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРУСІВ КРИМУ

Б.Г. Пустовитенко

Розглянуті просторово-часові властивості форшок-афтершокових послідовностей землетрусів Криму, зокрема, виконання законів Оморі й Гутенберга-Ріхтера.

**Ключові слова:** землетрус; афтершок; згруповуваність; закон Оморі; закон повторюваності.

## SOME PROPERTIES OF THE COMPLICATED SUCCESSIONS OF EARTHQUAKES OF CRIMEA

B.G. Pustovitenko

The space-time properties of the foreshock-aftershock successions of earthquakes of Crimea, especially, performance of Omori's and Gutenberg-Richter laws are observed.

**Keywords:** earthquake; aftershock; epicenters grouping, Omori's law, the repeatability law.

Інститут геофізики НАНУ