

УДК 550.34.09

АФТЕРШОКОВЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ СТРАН

Аристова И.Л., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассмотрено проявление афтершоковой деятельности в очагах 49 землетрясений с эпицентрами на территории Казахстана и сопредельных стран. Впервые к рассмотрению привлечены события в платформенных областях. Получены средние зависимости размеров афтершоковой области и времени проявления афтершоков от магнитуды землетрясений в сейсмичных областях. Показано, что сценарии афтершоковых процессов могут различаться даже для близких по магнитуде и месту расположения событий. Их различие определяют как тектонические условия, так и флюидные процессы в очаговых зонах.

Афтершоки несут важную информацию о процессах релаксации напряжений в очагах сильных землетрясений и о степени влияния на эти процессы флюидов. По результатам совместного рассмотрения поля гипоцентров афтершоков делаются важные выводы о размерах и пространственной конфигурации очагов сильных землетрясений. Афтершоки исследуются полевыми методами непосредственно после сильного землетрясения, а также на основе каталогов землетрясений, формируемых в Центрах данных.

В нашей работе изучены 49 сильных и умеренно сильных коровых землетрясений ($3,7 \leq M_w \leq 7,3$), име-

ющих афтершоки, за период с 1963 г. по 2014 г. в пределах территории, ограниченной координатами $39,23^\circ - 50,33^\circ$ с.ш., $52,50^\circ - 85^\circ$ в.д. Каталог главных толчков и соответствующая карта эпицентров приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Впервые к анализу привлечены события, относящиеся не только к высокосейсмичным областям горных хребтов Тянь-Шаня, Джунгарии, но и к платформенным слабосейсмичным районам Казахстана. Задача заключалась в поиске как общих закономерностей проявления афтершоков, так и в изучении особенностей афтершоков при разных сильных землетрясениях.

Таблица 1. Каталог изученных землетрясений

N	Дата	lat°	lon°	h	Mw	Название	N	Дата	lat°	lon°	h	Mw	Название
1	30.08.1963	44,65	79,75	20	5,1		26	19.03.1980	41,17	75,07	5	4,7	
2	27.11.1963	42,10	76,38	5	4,3		27	19.10.1980	44,35	79,40	33	4,3	
3	27.02.1964	44,27	78,85	12	4,6		28	30.06.1981	43,10	77,40	15	3,7	
4	25.09.1965	41,55	75,03	10	5,1	Сонкулское	29	30.08.1981	42,80	78,48	15	4,1	
5	18.10.1965	41,90	77,53	15	5,0	Барскаунское	30	31.12.1982	42,87	77,37	20	5,3	Новогоднее
6	07.11.1965	43,17	78,47	21	4,2		31	16.12.1983	39,38	72,92	10	5,9	
7	11.05.1967	39,50	73,70	28	6,3		32	23.10.1984	44,10	79,42	25	5,1	
8	20.08.1967	45,18	80,00	15	5,5		33	14.06.1990	47,95	85,00	42	6,6	Зайсанское 1
9	28.09.1967	42,27	79,48	18	5,1	Сары-Жазское	34	03.08.1990	47,80	84,77	33	6,1	Зайсанское 2
10	30.11.1967	42,98	77,48	14	4,5		35	12.11.1990	42,93	77,93	15	6,3	Байсорунское
11	20.03.1968	41,22	75,05	17	4,9		36	15.05.1992	41,10	72,42	5	6,3	
12	01.07.1968	44,50	78,17	33	4,7		37	19.08.1992	42,07	73,63	25	7,2	Суусамырское
13	01.05.1969	43,98	77,93	33	4,4		38	30.12.1993	44,82	78,77	20	5,4	Текелийское 1
14	24.12.1972	42,97	78,42	20	4,2		39	22.08.2001	47,20	70,20	15	5,2	Шалгинское
15	01.09.1973	42,53	75,22	10	4,6		40	22.05.2003	42,93	72,85	9	5,5	Луговское
16	04.03.1974	43,88	78,25	33	4,5		41	01.12.2003	42,92	80,55	-	6,0	Сюмбинское
17	02.07.1974	42,28	75,38	15	4,9	Кочкорское	42	26.04.2008	50,33	52,50	10	5,1	Шалкарское
18	11.08.1974	39,23	73,83	11	7,3		43	13.06.2009	44,77	78,82	25	5,4	Текелийское 2
19	12.02.1975	43,17	78,78	10	5,5	Торайгыское	44	02.03.2010	42,37	75,57	15	4,9	
20	31.01.1977	40,08	70,87	20	6,0		45	20.04.2010	43,82	78,03	5	4,6	
21	12.03.1978	41,98	79,67	40	5,4		46	01.05.2011	43,62	77,66	20	5,4	Капчагайское
22	24.03.1978	42,87	78,58	15	6,9	Жаланаш-Тюпское	47	30.05.2012	43,44	78,80	20	5,4	Советинское
23	21.06.1978	41,65	79,40	19	4,7		48	28.01.2013	42,61	79,63	10	6,1	Нарынкольское
24	01.11.1978	39,40	72,60	20	6,6		49	21.06.2014	49,56	72,97	5	4,4	Карагандинское
25	25.09.1979	45,00	77,00	40	5,7	Баканасское							

Примечание: lat° - широта; lon° - долгота; h - глубина; Mw – моментная магнитуда.

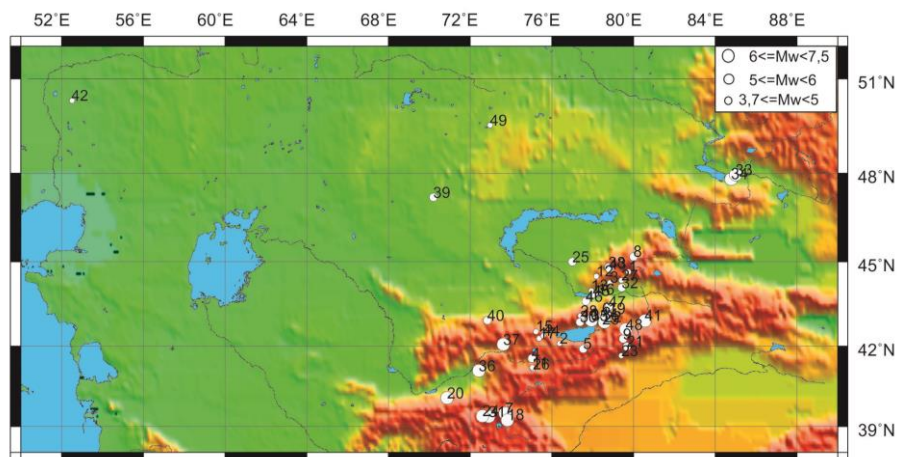


Рисунок 1. Эпицентры изученных землетрясений (согласно таблице 1)

Ранее по изучаемому району проведены исследования афтершоковых последовательностей за период с 1960 г. по 1984 г. [1], цель которых состояла в создании методики идентификации афтершоков сильных землетрясений в электронном каталоге SEISMO, созданном в Сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) МОН РК. Эта разработанная методика используется в практике СОМЭ до сих пор. В настоящей статье приведены результаты аналогичных исследований с использованием данных в более широком диапазоне времени и для территории большего размера.

Главным признаком афтершоков является их группирование в пространственно-временной области, непосредственно примыкающей к главному событию. Принадлежность того или иного землетрясения к афтершокам, может быть определена по его отношению к этой пространственно-временной области. Размеры такой области в общем случае определяются энергией главного толчка. Поле эпицентров афтершоковых последовательностей не всегда симметрично относительно эпицентра главного толчка: часто эпицентр главного толчка находится на краю эпицентрального поля афтершоков. Несимметричность может быть связана с протяженностью разрыва в очаге, особенностью концентрации афтершоков на одном борту разлома, вдоль которого произошла подвижка в очаге сильного землетрясения и др.

На первом этапе исследований на материалах каталога землетрясений Северного Тянь-Шаня исследована функция вида $R = f(M_w)$ и $T = f(M_w)$, где R и T – средний радиус области афтершоков и время проявления афтершоковой последовательности, соответственно, M_w – моментная магнитуда. Для установления значений R_i и T_i каждого i -го сильного землетрясения использован следующий прием: рассматривались графики функция $r_i(t)$, характеризующие изменения во времени расстояния между эпицентрами главного толчка и каждого из последова-

тельно происходящих более слабых толчков. Графики $r_i(t)$ строились по дискретным значениям r_j и t_j , соответствующих месту и времени j -го землетрясения относительно i -го сильного события. При этом для каждого i -го землетрясения анализ проводился в пределах области, заведомо превышающей по площади наибольшую вероятную область формирования афтершоков землетрясения с $M = M_i$. Размер такой области определялся исходя из значения длины очага L в километрах (или разрыва в очаге), приводимой в [1]. Вывод о значении T_i , т.е. выборка момента окончания периода афтершоков по каждому графику $r_i(t)$, делался по результату сопоставления частоты возникновения землетрясения в рассматриваемой области со своим фоновым уровнем. Сейсмической историей для каждого i -го события считался период времени, равный 2 годам. О размерах R_i заключение делалось при совместном анализе графиков $r_i(t)$ и соответствующих карт эпицентров событий.

Графики $r_i(t)$ оказались очень удобным и универсальным инструментом для анализа. Они позволяли в каждом конкретном случае рассмотреть развитие афтершокового процесса, оценить пространственно-временные параметры афтершоковой области, кроме того, судить об особенностях сейсмического режима в период подготовки сильного события, определять время и размеры областей затишья, активизации и т.д. Пример построенных графиков $r(t)$ представлен на рисунке 2.

Описанный подход применен для всех отобранных землетрясений из каталога базы данных, составленного в рамках проекта ЕМСА [2]. В таблице 2 приведены результаты определения параметров афтершоковых последовательностей (номера землетрясений соответствуют их нумерации в таблице 1).

По результатам анализа создана база данных по афтершоковым последовательностям, которая по существу является совокупностью унифицированных каталогов афтершоков.

**АФТЕРШОКОВЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ СТРАН**

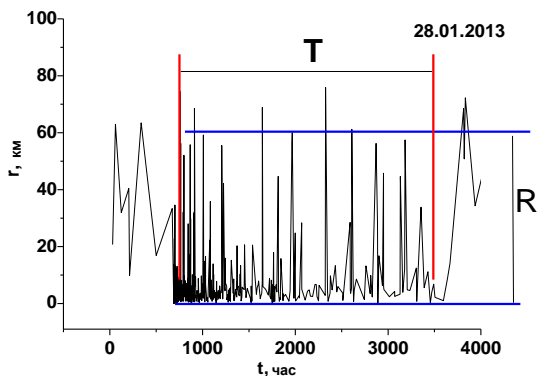


Рисунок 2. График r(t) для землетрясения 28.01.2013

Таблица 2. Каталог параметров афтершоковых последовательностей изученных землетрясений

N	Mmax	Mmin	R, км	T, дни	Наф.	ρ	Мгл - Mmax	Тип модели
1	4,05	3,11	11	22	2		1,1	
2	3,58	2,2	7	1	6		0,7	
3	3,3	3,2	20	47	2		1,3	
4	3,53	3,25	10	9	5		1,6	
5	3,39	2,2	20	5	5		1,6	
6	2,3	2	7	26	5		1,9	
7	5,2	2,44	59	474	143	0,70	1,1	II
8	2,92	2,54	26	40	4		2,6	
9	3,11	2,9	20	33	5		2,0	
10	2,68	2,68	3	9	1		1,8	
11	3,3	3,3	9	1	1		1,6	
12	2,87	2,87	12	6	1		1,8	
13	3,1	2,2	10	36	3		1,3	
14	3,3	3,3	10	3	1		0,9	
15	2,7	2,7	6	1	1		1,9	
16	2,8	2,8	2	1	1		1,7	
17	3,3	2,6	10	22	2		1,7	
18	5,9	2,4	79	915	1464	1,09	1,4	II
19	3,9	2,0	16	240	22	0,96	1,2	II
20	4,9	2,4	52,9	412	99	0,78	1,4	II
21	2,8	2,8	10	1	1		2,5	
22	4,7	1,8	37	252	146	1,03	2,3	I
23	3,6	3,6	12	33	1		1,1	
24	5,5	2,4	61	789	733	0,85	1,3	II
25	2,6	2,6	33	7	1		3,1	III
26	2,5	2,5	17	35	1		2,2	
27	3,1	2,4	11	1	2		1,2	
28	2,4	1,7	3	4	5		1,4	
29	2,3	2,1	7	1	2		1,8	
30	2,7	1,4	21	6	17	0,61	2,5	II
31	5,1	2,4	46,3	288	249	0,92	1,0	II
32	4,6	2,1	16	105	5		0,7	
33	6,2	1,5	67	158	82	0,95	0,7	II
34	5,2	1,5	56	77	15		0,9	
35	4,4	1,5	17	175	112	1,16	1,9	II
36	4,9	2,4	12,7	508	820	1,02	1,5	II
37	6,4	2,4	70	915	1345	1,00	0,9	I
38	4,4	1,6	22,4	456	457	1,15	1,0	I
39	3,2	0,8	7	17	6		1,8	III
40	4,0	0,8	52,4	72	231	1,18	1,5	I
41	4,7	2,2	20	167	198	1,10	1,3	I

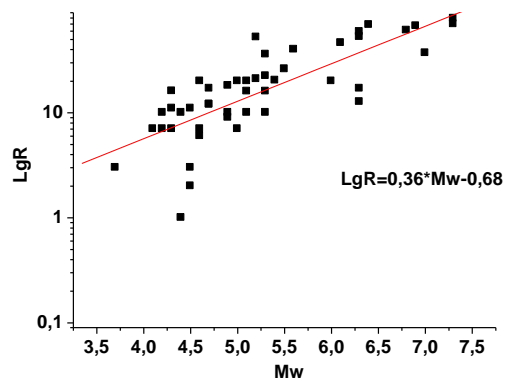
N	Mmax	Mmin	R, км	T, дни	Наф.	ρ	Мгл - Mmax	Тип модели
42	3,4	3,4	7	84	1		1,2	III
43	3,9	1,2	36	363	151	1,09	1,5	I
44	3,7	1,3	18,1	59	49	0,98	1,2	II
45	2,8	1,3	16,08	22	9		1,5	
46	5,0	2,0	40,12	239	235	1,20	0,5	I
47	2,6	1,1	20,3	9	31	1,37	2,8	I
48	5,0	1,8	68,84	125	651	1,08	1,1	I
49	1,3	1,3	1	1	1		3,1	III

Примечание: Mmax – максимальная магнитуда афтершоков; Mmin – минимальная магнитуда афтершоков; R – средний радиус области афтершоков; T – время проявления афтершоковой последовательности; Наф. – количество афтершоков в афтершоковой последовательности; ρ – параметр, характеризующий скорость уменьшения сейсмической активности; Мгл – магнитуда главного толчка.

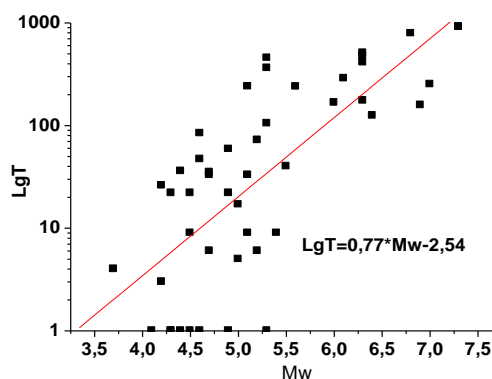
СРАВНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ДАННОМ ИССЛЕДОВАНИИ И ПРИВЕДЕННЫХ В [1]

Полученные значения T_i и R_i стали исходными данными для построения графиков и нахождения зависимостей функций $R = f(M)$ и $T = f(M)$. На рисунке 3 показаны зависимости для расстояний и продолжительности афтершоковых последовательностей, которые аппроксимируются следующими соотношениями:

$$\lg T \text{ (дни)} = 0,77 \cdot M_w - 2,54, \quad \lg R = 0,36 \cdot M_w - 0,68.$$



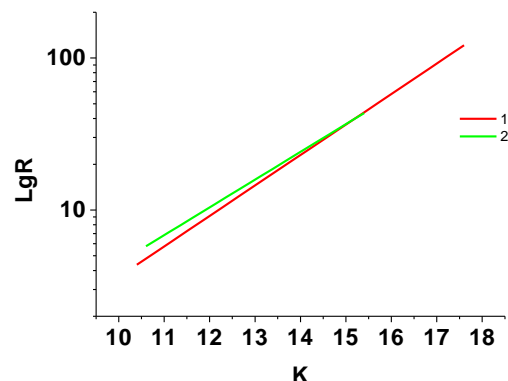
а) от размера области



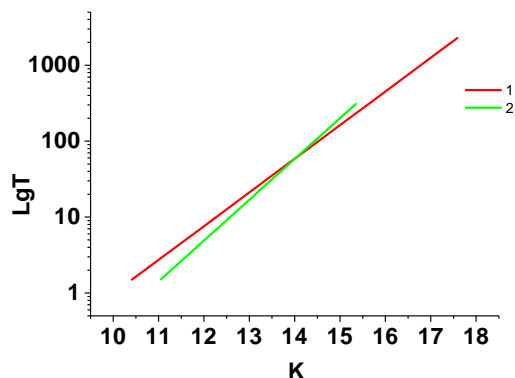
б) от продолжительности

Рисунок 3. Зависимости размеров области (а) и продолжительности (б) афтершоковых последовательностей от магнитуды M_w

Проведено сравнение найденных зависимостей $R = f(M_w)$ и $T = f(M_w)$ с зависимостями, приведенными в [1], для чего полученные функции были пересчитаны и приведены к зависимостям вида $R = f(K)$ и $T = f(K)$, где K – энергетический класс по шкале Т.Г. Раутиан (рисунок 4).



а) $R = f(K)$



б) $T = f(K)$

— результаты данных исследований; — согласно [1]

Рисунок 4. Сравнение зависимостей, полученных в данном исследовании и приведенных в [1]

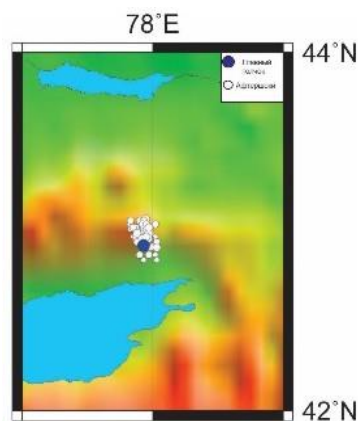
Полученные результаты позволяют сделать вывод, что увеличение объема данных по сильным землетрясениям, произошедшим в последние годы, в целом, не изменило существенно полученные ранее средние соотношения для характеристик афтершоковых последовательностей. Таким образом, эти зависимости могут быть использованы для выделения афтершоков в выборках землетрясений.

ИЗУЧЕНИЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С АФТЕРШОКОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ

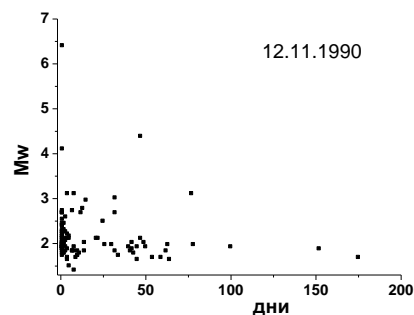
Детальный анализ каждого сильного землетрясения с его афтершоковой последовательностью проведен унифицированным способом: изучались пространственные характеристики поля афтершоков, затухание афтершокового процесса во времени, закономерности высвобождения энергии после главного толчка (рисунок 5).

Далее по каждому землетрясению в отдельности оценивались такие параметры, как размер поля афтершоков, длительность периода процесса, разница

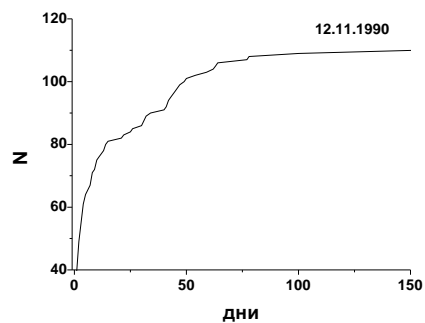
магнитуд главного толчка и наиболее сильного афтершока, а также общее количество идентифицируемых афтершоков. Особое внимание уделено изучению зависимостей во времени общего количества афтершоков, отражающих состояние зоны разлома после произошедшего землетрясения.



а) эпицентры основного толчка и афтершоков



б) зависимость магнитуды от времени



в) зависимость суммарного количества афтершоков от времени

Рисунок 5. Анализ афтершоковых последовательностей на примере землетрясения 12.11.1990 г.

Анализ данных, полученных по 49 землетрясениям, показал, что разные землетрясения совершенно по-разному проявляются в своей афтершоковой деятельности, которая может быть разделена на три основных типа: 1 (рисунок 6-а) – афтершоковые последовательности с гладкой формой графика $N(T)$; 2 (рисунок 6-б) – процессы со ступенчатой формой графика $N(T)$; 3 – афтершоковые процессы в слабо сейсмичных, главным образом, платформенных рай-

онах (таблица 2). 1 тип афтершоковой деятельности – это простая релаксационная модель. При 2 типе афтершокового процесса, как показал пример эволюции повторных толчков Зайсанского землетрясения 14.06.1990 г., практически все повторные землетрясения возникают группами, причем периоды активизации чередовались с периодами покоя.

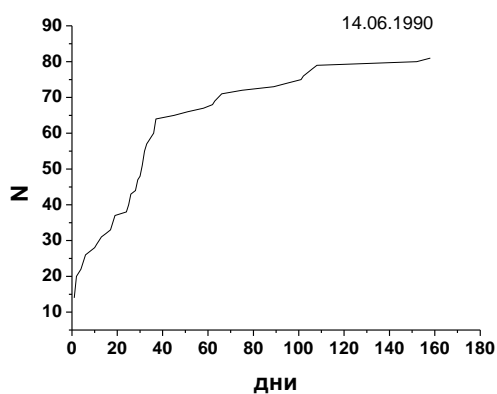
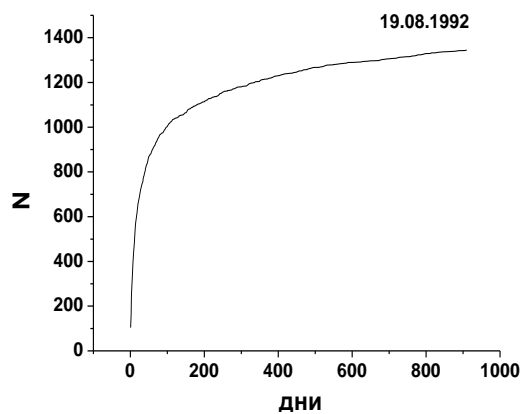


Рисунок 6. Типы афтершоковых последовательностей

Распределение землетрясений с разными типами афтершоковых процессов в высокосейсмичных районах Тянь-Шаня и Джунгарии показано на рисунке 7.

Закон, описывающий уменьшение интенсивности потока афтершоков во времени, описывается степенной функцией (закон Омори) [3]: $N(t) = K/(t+c)^p$, где: $N(t)$ – число афтершоков в единицу времени, p – параметр, характеризующий скорость уменьшения сейсмической активности. График для афтершоковой последовательности в двойном логарифмическом масштабе (рисунок 8) позволяет определить параметр p по наклону аппроксимирующей прямой [4]. Значения p были рассчитаны для всех событий 1 и 2 типа. Для процессов 1 типа параметр p немного больше или равен 1 ($1 \leq p \leq 1,37$), а для 73% афтершоковых последовательностей 2 типа параметр p меньше единицы ($0,61 \leq p \leq 0,98$).

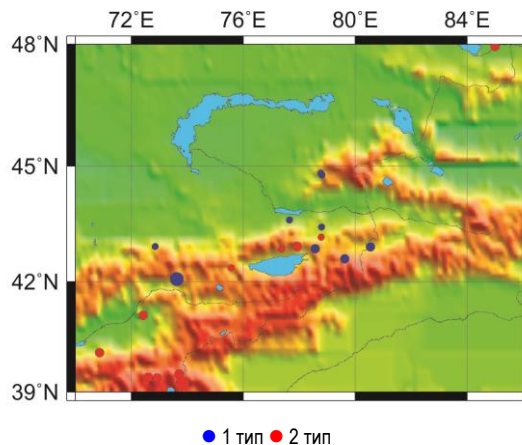


Рисунок 7. Карта эпицентров главных толчков афтершоковых последовательностей в районах Тянь-Шаня и Джунгарии

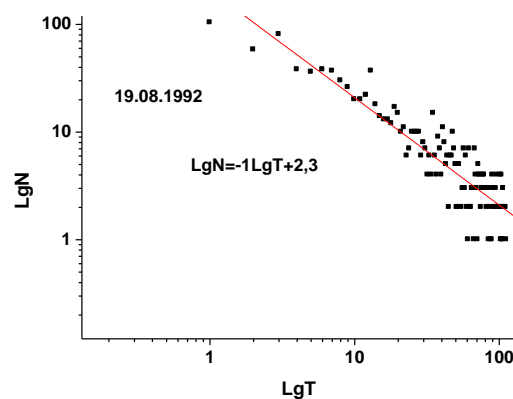
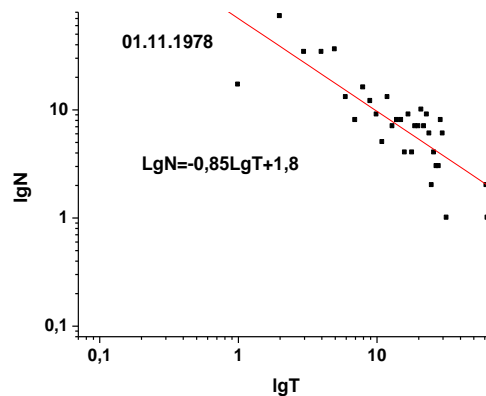
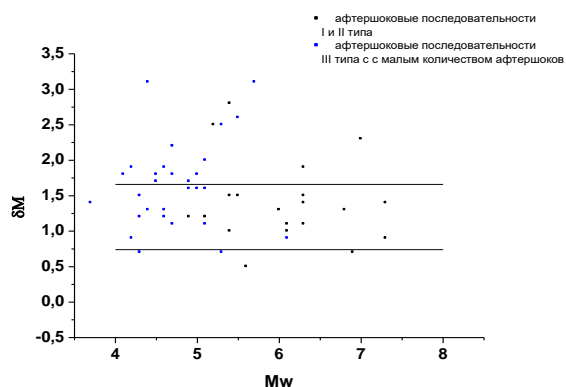


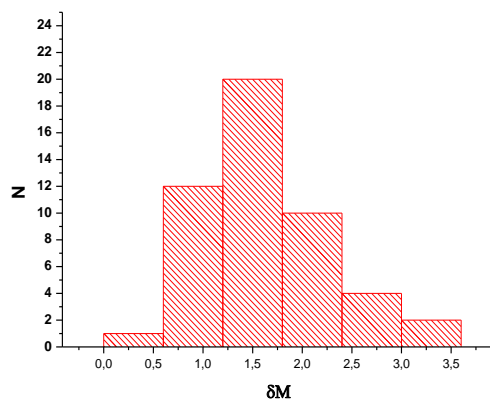
Рисунок 8. Графики $N(T)$ в двойном логарифмическом масштабе для расчета параметра p , характеризующего скорость уменьшения сейсмической активности афтершоков

Были рассмотрены энергетические характеристики афтершоковых последовательностей. Проверяя выполняемость закона Бота [5], из рисунка 9 видно, что для афтершоковых последовательностей 1 и 2 типа закономерность подтверждается – наиболее вероятная разница в магнитудах главного толчка и

сильнейшего афтершока δM составляет 1 – 1,5 единиц магнитуды M_w , а для афтершоковых последовательностей 2 типа и с малым количеством афтершоков во многих случаях разность между магнитудой главного толчка и максимальной магнитудой афтершока намного больше.



а) значения δM



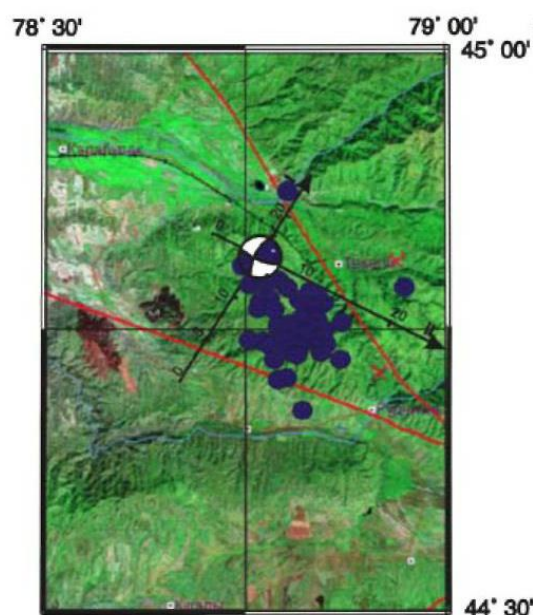
б) распределение значений δM

Рисунок 9. Распределение значений δM -разности магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока

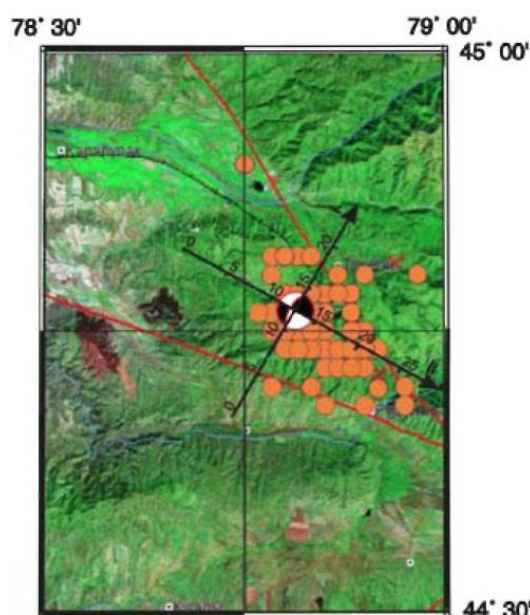
Большой интерес представляет собой изучение проявления афтершоков для близких по времени, пространству и магнитуде сильных землетрясений. Существует ли подобие в процессах высвобождения энергии в очагах, произошедших в сходных тектонических условиях? Имелось несколько вариантов подобных событий. Два одинаковых по силе и местоположению землетрясения, вызвавшие 7-балльные сотрясения в г.Текели в 30.12.1993 г. и 13.06.2009, дают возможность изучения условий, способствующих их возникновению и развитию афтершоковых последовательностей [6].

Каталог афтершоков землетрясения 13.06.2009 г. включает более 150 афтершоков в диапазоне магнитуд от 1,2 до 3,9. Самый сильный афтершок с $M_w=3,9$ произошел через 7 мин после главного толчка, он ощущался в г. Текели с интенсивностью 5 баллов. В плане облако афтершоков сконцентрировано в блоке между Западно- и Южно-Джунгарским

разломами (рисунок 10) и вытянуто в юго-восточном направлении. Подобную картину можно наблюдать и при землетрясении 1993 г., только как главный толчок, так и связанное с ним поле афтершоков сдвинуты на северо-запад относительно картины 2009 года. Вся афтершоковая деятельность как при первом, так и при втором землетрясениях развивалась только в южном, висячем крыле разрывов, преимущественно на глубине $H > 10$ км. Афтершоковая активизация быстро затухала во времени, при этом отмечалось чередование процессов дилатансионно-го упрочнения и разупрочнения.



а) 30.12.1993 г.



б) 13.06.2009

Рисунок 10. Эпицентры главных толчков и афтершоков Текелийских землетрясений 1993 г. и 2009 г.

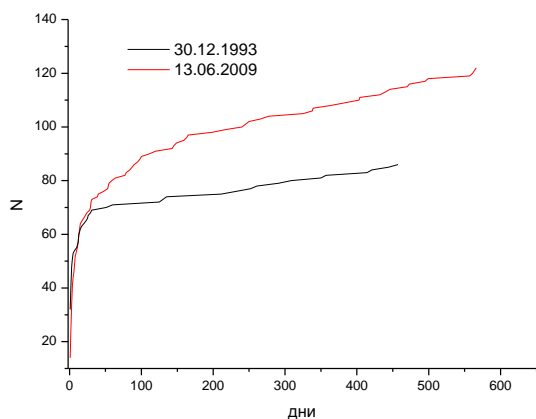
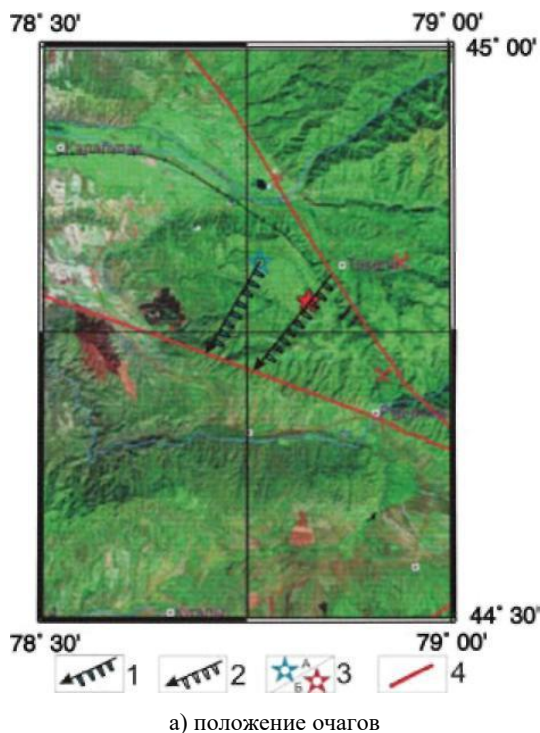


Рисунок 11. Результаты интерпретации афтершоковой деятельности Текелийских землетрясений 1993 и 2009 гг.

Предлагаемая интерпретация процессов в очагах Текелийских землетрясений, зарегистрированных в блоке между Южно- и Западно- Джунгарским разломами, отражена на рисунке 11.

Это круто падающие в юго-восточном направлении субпараллельные разрывы северо - восточного простирания. В первом движении подвижки представляют собой сдвиги по крутым плоскостям, по мере развития разрыва тип дислокации меняется на взброс, плоскость падения становится более пологой. Два Текелийских землетрясения настолько похожи по всем параметрам, что могут считаться происходящим по единому сценарию. Второе землетрясение продолжило начатые первым разрушения в блоке земной коры, развивая на юго-восток релакса-

ционные процессы в одном и том же напряженном объеме за счет последующих толчков.

В отличие от Текелийских землетрясений, три землетрясения 2011-2013 гг. с магнитудой $M_w = 5.1 - 6.1$ – Капчагайское (01.05.2011 г., $M_w = 5.1$), Согетинское (30.05.2012 г., $M_w = 5.4$), Нарынкольское (28.01.2013, $M_w = 6.1$) несмотря на то, что их очаги сконцентрированы в близкой по времени и пространству области (рисунок 12), связаны практически с одним и тем же тектоническим разломом [7], имеют энергию в небольшом диапазоне значений, сильно различаются по проявлению афтершоков. Распределение афтершоков по энергиям и во времени характеризуют рисунки 13.

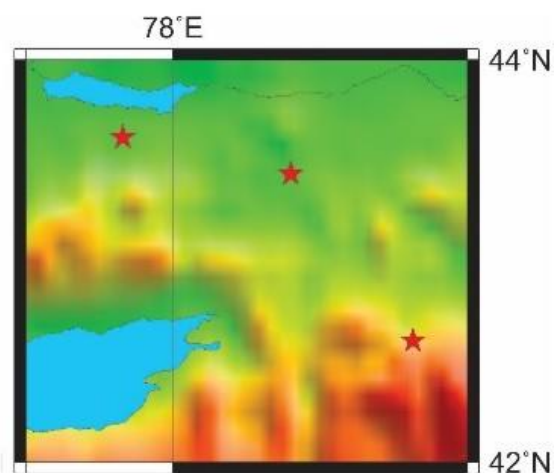


Рисунок 12. Эпицентры Капчагайского, Согетинского, Нарынкольского землетрясений

Капчагайское землетрясение предварял слабый форшок с $M_w=1,6$, зарегистрированный за 2,5 часа до основного толчка. После землетрясения последовала серия афтершоков, аномально высокая как по общему числу повторных толчков для такого сравнительно несильного главного толчка, так и по количеству относительно сильных толчков с $M_w>3$. Всего зарегистрировано 235 афтершоков этого землетрясения, большая часть из которых была зарегистрирована в первые 10 дней. Тринадцать наиболее сильных толчков с $M_w>3$ произошли в первые 4 дня. Через месяц, 2 июня, был зарегистрирован еще один афтершок с $K=3,11$.

Сейсмический эффект Согетинского землетрясения был гораздо слабее. Главный толчок не сопровождался сильными афтершоками, энергетический уровень большинства повторных толчков колебался в пределах $M_w=1,1 - 1,6$, только у двух наиболее сильных он достиг значения $K=2,6$. Всего зарегистрирован 31 афтершок этого землетрясения, почти все из них реализовались в первые 2 дня, причем половина произошла в течение 2,5 часов после главного толчка, координаты эпицентров афтершоков практически совпадают с координатами главного события.

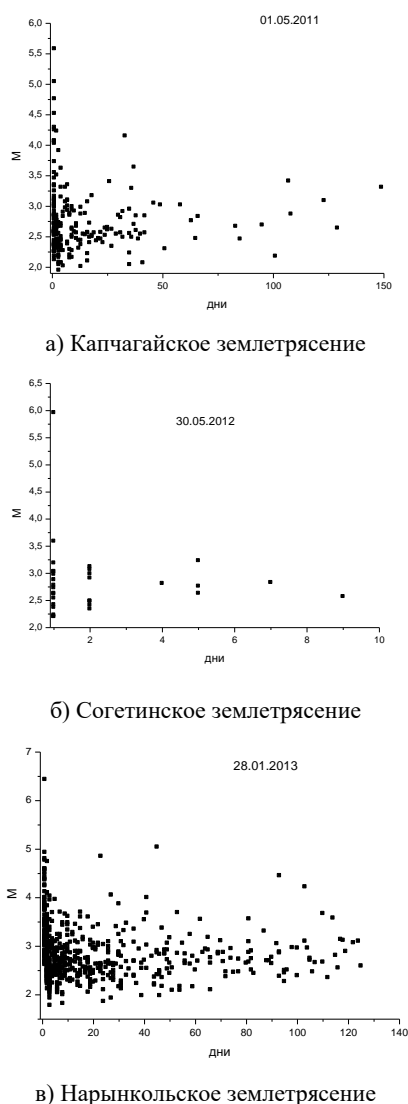


Рисунок 13. Затухание афтершоковой деятельности в очагах трех землетрясений

После Нарынкольского землетрясения в течение месяца зарегистрированы около 700 афтершоков, большая часть из которых произошла в первые три дня. Большинство наиболее сильных толчков с $M_w > 3$, в том числе с $M_w = 5$, произошли в первые два дня. Через 20 дней, 19 февраля, был зарегистрирован еще один афтершок с $M_w = 3,8$, затем в марте и в апреле произошли афтершоки $M_w = 4$ и $M_w = 3,5$, положение эпицентров, которых практически совпало с положением главного толчка.

Из анализа затухания афтершоковой деятельности в рассмотренных очагах, следует, что «крайние» с севера и юга землетрясения Капчагайское и Нарынкольское характеризовались большим количеством афтершоков (рисунок 14), среди которых были и сильные, ощущавшиеся в населенных пунктах. При «среднем» (Согетинском) землетрясении афтершоков было мало, сильные повторные точки отсутствовали.

На рисунке 15 показано положение афтершоков рассматриваемых землетрясений в плане. Из рисунка видно, что облака афтершоков всех трех событий имеют изометричную форму. Пространственное положение областей афтершоков Капчагайского и Нарынкольского землетрясений было уточнено методом двойных разностей, что позволило установить трехмерную конфигурацию и размеры очаговых зон [7]. Размеры очагов «крайних» событий геологически фиксированы размерами блоков и соответствуют средним размерам очагов землетрясений соответствующей магнитуды. То есть, пространственно-временные характеристики афтершоковых последовательностей для «крайних» событий - северного Капчагайского и южного Нарынкольского - более близки между собой, чем с Согетинским землетрясением.

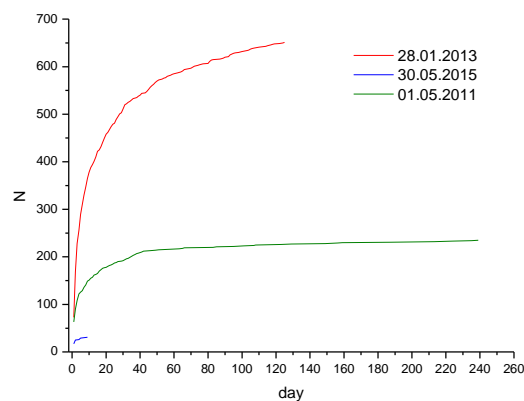


Рисунок 14. Распределение количества афтершоков от времени при трех землетрясениях на Северном Тянь-Шане в 2011–2013 гг.

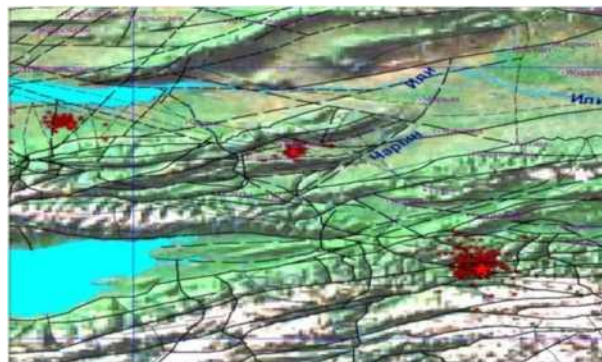


Рисунок 15. Эпицентры главных толчков и афтершоков Капчагайского, Согетинское, Нарынкольского землетрясений

Был сделан вывод, что в очагах землетрясений, близких по энергетическим характеристикам и сформировавшимся в сходных сеймотектонических условиях, возможны совершенно различные сценарии высвобождения энергии, что делает затруднительным прогноз развития сейсмического процесса после сильного главного толчка.

Закономерностью можно считать обнаруженное четкое различие в процессах после сильных землетрясений в платформенных и горных областях. Полное отсутствие или малое количество афтершоков после сильных землетрясений характерно для событий в слабоактивных районах. Можно было бы предположить, что это «субъективный» факт, связанный с отсутствием хороших сетей наблюдений в асейсмичных районах. Однако в нескольких случаях в эпицентральную область оперативно выезжала экспедиция с сейсмическими станциями, но афтершоков не было зарегистрировано, как, например, при Баканасском землетрясении 1979 года с $M_w=5,7$. Также сразу после Шалгинского землетрясения 22.08.2001 г. с $M_w=5,2$ для уточнения основных параметров главного толчка и регистрации возможных афтершоков в район эпицентра выехала экспедиция с полевой сейсмической аппаратурой. Было установлено 5 сейсмических станций «Карс» по ортогональной сети с расстоянием 10 км между центральной станцией и радиальными. Регистрация афтершоков осуществлялась трехкомпонентными сейсмоприемниками. Продолжительность одного цикла наблюдений составила 5 суток. Было отработано два цикла: с 30.08.01 по 03.09.01 и с 04.09.01 по 09.09.01. Всего после Шалгинского землетрясения было зарегистрировано 6 афтершоков, магнитуда самого сильного из них 3,2, остальные афтершоки существенно слабее. Можно утверждать, что в очагах сильных землетрясений в платформенных зонах практически не происходит релаксации напряжений после главного толчка.

По-видимому, большую роль в процессе генерации афтершоков играют флюиды. Важно как их наличие или отсутствие, так и количество и глубинное распределение. В работах [8,9] на примере Жаланаш-Тюпского землетрясения и его афтершоков была показана связь глубинного распределения поля

афтершоков с характеристиками поглощения среды. В свою очередь, зоны сильного поглощения с большой вероятностью связаны с зонами поступления флюидов из глубинных слоев нижней коры и верхней мантии. Именно отсутствие флюидов в зонах очагов платформенных землетрясений может определять отсутствие афтершоков. При этом сброшенные напряжения в их очагах могут значительно превосходить их значения в очагах сейсмичных регионах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере рассмотренных землетрясений территории Казахстана и прилегающих территорий других стран установлены некоторые закономерности в проявлении афтершоков сильных землетрясений.

1. Для землетрясений в горных областях найдены средние зависимости размеров поля афтершоков и времени их проявления от магнитуды главного толчка, которые могут быть использованы в различных задачах, требующих маркировки афтершоков большого количества событий в каталогах.

2. Афтершоковые последовательности землетрясений в высокосейсмичных областях могут быть разделены на два типа, различающиеся по виду графиков, характеризующих затухание афтершоков. Простая релаксационная модель более вероятна в этих зонах.

3. Для близких во времени, пространстве и по магнитуде сильных землетрясений могут иметь место разные сценарии афтершоковых последовательностей. Сделан вывод, что не только тектонические условия, но и флюидный режим определяют закон высвобождения энергии после главного толчка.

4. В платформенных областях сильные землетрясения, как правило, не имеют или имеют только единичные афтершоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакиев, Ю.И. Методика идентификации афтершоков в машинном каталоге / Ю.И. Бакиев, Н.Н. Михайлова, О.К. Ревенко // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР. – Москва: Наука, 1989 – С. 126 – 131.
2. Mikhailova, N.N. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009 / A.S. Mukambayev, I. L. Aristova, G. Kulikova, Ullah Shahid, Pilz Marco, Bindi Dino // Annal of Geophysics, 2015. – Vol 58, No 1.- P. 1 – 9. - DOI: <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6681>.
3. Omori, F. On after-shocks of earthquakes / F. Omori // J. Coll. Sci. Imp. - Univ. Tokyo, 1894. – V. 7. – P. 111 – 200.
4. Kanamori, H. The physics of earthquakes / H. Kanamori, E.E Brodsky // Rep. Prog. Phys., 2004. – Vol. 67. – P. 1429 - 1496.
5. Shcherbakov, R. A Generalized Omori's Law for Earthquake Aftershock Decay / R. A. Shcherbakov, D.L. Turcotte, J.B. Rundle // Geophysical Research Letters, 2004. - V. 31 (11). - Article ID: L11613.5.
6. Михайлова, Н.Н. Текелийское Землетрясение в Казахстане в 2009 году: очаг и воздействия / Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко // Вопросы инженерной сейсмологии, 2010. – Т.37. - № 2. – С. 20 - 33.
7. Михайлова, Н.Н. Общие закономерности и особенности проявления очагов последних сильных землетрясений на Северном Тянь-Шане / Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко // Вестник НЯЦ РК, 2015. – Вып. 4. – С. 144 - 149.
8. Кветинский, С.И. Неоднородности литосферы и астеносферы в очаговых зонах сильных землетрясений Северного Тянь-Шаня / С.И. Кветинский, Ю.Ф. Копничев, Н.Н. Михайлова [и др.] // Докл.АН СССР, 1993. – Т.329. – №1. – С. 25 - 53.
9. Михайлова, Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных параметрах сильных движений грунта (на примере г. Алматы) / Н.Н. Михайлова // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, 1996. – 338 с.

**ҚАЗАҚСТАН МЕН ШЕКТЕС ЕЛДЕР АУМАҚТАРЫНЫҢ ҚАТТЫ
ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ АФТЕРШОК ЖҮЙЕЛІЛІГІ**

Аристова И.Л., Михайлова Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Эпиорталықтары Қазақстан мен шектес елдердің аумағындағы 49 жерсілкінулердің ошақтағы афтершок әрекеті білінуі қарастырылған. Алғашқы рет қарастырылуға платформалық аймақтардағы оқиғалар тартылған. Сейсмикалық аймақтардағы жерсілкінудің магнитудасынан афтершок аймақтардың мөлшерлері мен афтершоктар біліну уақытының орташа тәуелділігі алынған. Магнитудасы мен оқиға орналасу жері бойынша бір біріне жақын келетін оқиғалар үшін афтершок процесстердің сценарийлері арасында айырмашылық болуы көрсетілген. Олардың айырмашылығын тектоникалық жағдайлары да, ошақ зоналарындағы флюидті процесстері де белгілейді.

**AFTERSHOCK SEQUENCES OF LARGE EARTHQUAKES ON THE
TERRITORY OF KAZAKHSTAN AND ADJACENT COUNTRIES**

I.L. Aristova, N.N.Mikhailova

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

The paper describes aftershock activity in the sources of 49 earthquakes with epicenters on the territory of Kazakhstan and adjacent countries. For the first time the events occurred on platform regions were considered. The average dependencies for aftershock region size and time of aftershock appearance on earthquake magnitude at seismic areas were received. The scenario of aftershock processes can differ even for events close by magnitude and location. Those are influenced by tectonic settings and fluid processes in origin zones.