УДК 550.348.435

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 2014 ГОДУ Пустовитенко Б. Г., Бондарь М. Н.

Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия E-mail: bpustovitenko@mail.ru

Рассмотрены пространственно-временные свойства сложной последовательности землетрясений, связанной с ощутимым сейсмическим толчком 2 марта 2014 года с магнитудой Mw = 4.1. Главное землетрясение со сбросовой подвижкой в очаге произошло под действием растягивающих напряжений. Землетрясение предварялось форшоками и сопровождалось шлейфом афтершоков, частота возникновения которых уменьшалась со временем по закону Омори. Сейсмический режим в период активизации зоны существенно отличался от долговременного. Поле всей совокупности землетрясений представлено в виде эллипса, наибольшая ось которого ориентирована субмеридионально вдоль изобат континентального склона и одной из нодальных плоскостей из решения механизма очага. Для главного толчка приведены динамические параметры очага.

Ключевые слова: механизм очага, группируемость, форшоки, афтершоки, закон Омори, график повторяемости, очаговая зона, динамические параметры очага.

введение

2 марта 2014 г. в центральной зоне Крымско-Черноморского региона в земной коре района континентального склона Черного моря вблизи Южного берега Крыма произошло ощутимое землетрясение, которое предварялось серией форшоков и сопровождалось длительным шлейфом последующих толчков – афтершоков [1]. По группируемости землетрясений центральная часть степени Крымского сейсмоактивного региона относится к наиболее сложным и неоднородным районам. В соответствии с классификацией Моги [2] в центральной зоне региона часто возникают группы взаимосвязанных землетрясений типа I и II: I – главный толчок → афтершоки и II- форшоки — главный толчок — афтершоки [3-5]. В краевых зонах региона происходят преимущественно одноактные сейсмические события [6]. Сложная последовательность землетрясений 2014 г. относится ко ІІ-типу группируемости, рассмотрению пространственно-временных свойств которой посвящена данная работа.

1. ОСНОВНОЙ ТОЛЧОК

Главный толчок 2 марта 2014 г. в $03^{h}34^{m}28.3^{s}$ с координатами гипоцентра: ϕ =44.30°N, λ =34.33°E, *h*=28 км и с энергетическим классом K_{Π} = 11.2, ощущался населением на Южном берегу Крыма. Сейсмические сотрясения с интенсивностью *I*=2,5–3 *балла* отмечены в трех населенных пунктах: Ялта (Δ = 25 км), Малый Маяк (Δ = 36 км), Алушта (Δ = 43 км) [1].

Сейсмические волны от этого землетрясения зарегистрированы 138 сейсмическими станциями мировой сети до эпицентральных расстояний 7842 км.

Соответственно, в крупных Международных сейсмологических центрах определены его основные параметры (табл. 1).

Таблица 1.

Основные параметры землетрясения 2 марта 2014 г. по данным различных сейсмологических агентств

A FRUTE No. / No. /		<i>t</i> -	Sto		Гипоц	ентр		Morning	Haman	
тво	INS / INf	10, Ч МИН С	010, C	φ°, N	λ° , Ε	δ°	h, км	магнитуда (кол-во станций)	ник	
Крым	11/19	03 34 28.3	0.9	44.30	34.33	0.01	28	K_{π} =11.2(2), ML_{WSG} =3.9(2), MD=3.5(5), Mc =3.3, Mw=4.12(7)*	[1]	
MOS	/46	03 34 25.8	1.14	44.31	34.25	0.06	11	<i>mb</i> =3.8	[7[
ISC	138/174	03 34 28.6	0.9	44.28	34.31	0.06	26	mb=3.4(8), ML=4.1	[8]	
NEIC	/18	03 34 27.4	1.9	44.31	34.39	0.08	10		[8]	
IDC	/20	03 34 25.9	0.6	44.35	34.39	0.1	Of	<i>mb</i> =3.4(8), <i>mb</i> 1=3.5(15), <i>mb</i> 1mx=3.4(48), <i>mb</i> tmp=3.4(15), <i>ML</i> =3.3(7), <i>MS</i> =2.7, <i>MS</i> 1=2.7,	[8]	

Примечание: N_S/N_f – количество станций и сейсмических фаз, участвующих в определениях координат; * – магнитуда по сейсмическому моменту по результатам данной работы (см. Табл. 4)

Вычисленные по данным всех агентств средние значения координат эпицентра: $\phi^{\circ} = 44.^{\circ}31$ и $\lambda^{\circ} = 34^{\circ}.34$ получились близкими к таковым по Крыму (Рис. 1).



Рис. 1. Расположение эпицентра землетрясения 02.03.2014 г. по данным: 1 – обработки в Крыму; 2 – в Международных центрах; 3 – ближайшая сейсмическая станция «Ялта».

В целом получены согласованные (в пределах погрешностей) координаты эпицентра с разбросом данных 0°.02 – по широте и 0°.03 – по долготе по отношению к таковым по Крыму и вычисленному по данным всех агентств среднему значению ($\varphi^{\circ} = 44.^{\circ}31$ и $\lambda^{\circ} = 34^{\circ}.34$). В то же время, интервал значений глубин составил от 0 (фиксированное значение по IDC) до 26–28 км по данным обработки в Крыму и в Международном центре данных (ISC) с привлечением 138 станций Мировой сети, включая региональные станции Крыма.

За окончательное принято решение, полученное в Крыму с использованием записей волновых форм на ближайших к эпицентру сейсмических станциях, наиболее чувствительных к глубине очага. Это решение включено в каталоги для последующего использования в различных научных и прикладных задачах сейсмологии, в частности при оценке очаговых параметров.

Очаговые параметры

Механизм очага землетрясения 2 марта восстановлен по стандартной методике в рамках двойного диполя [9]. Использовано 62 знака первых вступлений продольных волн на региональные и международные сейсмические станции, расположенные в широком азимутальном окружении относительно очага. В соответствие с полученным решением землетрясение 2 марта произошло под действием горизонтальных ($PL_T = 8^\circ$) сил растяжения, ориентированных близширотно ($AZM_P = 117^\circ$). Тип подвижки в очаге – сбросо-сдвиг с преобладанием сбросовой компоненты над сдвиговой (Табл. 2, Рис. 2). Первая плоскость разрыва NP1 имела диагональную ориентацию ($STK_{NP1} = 44^\circ$) с наклонным падением ($DP_{NP1} = 57^\circ$) на юго-восток, а другая NP2 – близмеридиональную ($STK_{NP2} = 184^\circ$), также с пологим падением ($DP_{NP2} = 41^\circ$) на запад.



Рис. 2. Стереограмма механизма очага землетрясения 2 марта 2014 г. в проекции нижней полусферы. *1* – нодальные линии; *2*, *3* – оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

Таблица 2.

Дата,	t_0 ,	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
дм	ч мин с	T		N		Р		NP1			NP2		
		PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
02.03.	03 34 28.3	8	117	21	210	68	5	44	57	-65	184	41	-122

Параметры механизма очага землетрясения 2 марта 2014 г. с К_П=11.2

Динамические параметры очага восстановлены по записям продольных *P*волн и поперечных *S*-волн на четырех региональных сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU). По параметрам механизма очага определены поправки за направленность излучения $R_{\theta\phi}$ из очага на станции регистрации (табл. 3), которые далее использованы для уточнения скалярного сейсмического момента M_0 по формуле (1) и других динамических параметров [10–12].

$$M_0 = \Omega_0 (4\pi \rho \cdot V^3) / R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot Sm(f)$$
(1)

Таблица 3.

Значения станционных поправок $R_{\theta\phi}$ для землетрясений 2 марта 2014 г.

Станция	S	IM	SEV	S	UDU	ALU		
Тип волны	Р	P S		Р	S	Р	S	
$R_{ heta \phi}$	0.09	0.54	0.32	0.21	0.39	0.56	0.27	

Ранее [13] при отсутствии на тот момент решения механизма очага было принято среднее значение $R_{\theta\phi} = 0.4$ для всех станций, участвующих в оценке динамических параметров. В таблице 4 даны уточненные значения динамических параметров очага землетрясения 2 марта с учетом поправок за направленность излучения $R_{\theta\phi}$ и повторной интерпретации амплитудных спектров.

Из таблицы 4 видно, что получена хорошая сходимость станционных определений динамических параметров с малым стандартным отклонением от среднего значения для данного очага, что позволяет выполненные оценки отнести к категории надежных, достоверных. На основании этого можно заключить, что в процессе снятия напряжений в очаге главного землетрясения 2 марта 2014 года для перемещения бортов разрыва на величину подвижки $\bar{u} = 2.5 \, cm$, была произведена работа, эквивалентная сейсмическому моменту $M_0=188\cdot10^{13}$ *H*·*m*. При этом сброшенное напряжение $\Delta \sigma$, равное 11.18·10⁵, *Па* (11 бар) превысило кажущееся по примерно в 4 раза за счет гладкого скольжения по разрыву ($\Delta \sigma_r = 1.68\cdot10 \, \Pi a$). Энергия дислокации *E*u в очаге радиусом $r_0=0.89 \, \kappa m$ составила 3.5·10¹⁰ *Дж*, а деформация среды $\varepsilon = 37.3\cdot10^{-6}$.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 2014 ГОДУ

Таблица 4.

Спектральные и динамические параметры очага землетрясения 2 марта с $K_{\Pi} = 11.2$

Станция	Волна	Составлянощая	$\Delta, \kappa M$	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, $M \cdot c$	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, $\mathcal{M}c$	$f_0, \Gamma \eta$	$M_0.10^{13}, H.m$	r ₀ , км	$\Delta \sigma \cdot 10^5, \Pi a$	£.10 ⁻⁶	$\bar{u} \cdot 10^{-2}, _{M}$	ησ·10 ⁵ , <i>Πα</i>	$\Delta \sigma_{\rm r} \cdot 10^5, \Pi a$	$\mathrm{Eu}{\cdot}10^{8},$ $Д c$	Mw^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	2 ма	арта. і	$t_0 =$	03 4 3	84 ми	н 28.	3 <i>c</i> ; φ =	44.30	°, λ = 3	34. 33°	; h =	28 кл	і; К п :	= 11.2	
ALU	Р	Ζ	43	1.5		2.7	148.0	0.91	8.6	28.6	1.9	3.21	1.08	212.0	4.05
ALU	S	N+E	43		6	1.7	182	0.76	13.8	46.0	2.8	2.61	4.29	419	4.11
SEV	S	N+E	59		3	1.65	123	0.86	8.5	28.4	1.77	3.87	0.39	174	4.0
SIM	Р	Ζ	75	0.75		2.8	280	0.88	18.1	60.5	3.86	1.7	0.74	848	4.23
SIM	S	N+E	75		12	1.52	189	0.93	10.2	34.1	2.31	2.52	2.6	322.0	4.12
SUDU	Р	Ζ	84	0.5		2.5	220.0	0.98	10.1	33.7	2.41	2.17	2.89	370.0	4.16
SUDU	S	N+E	84		4.95	1.5	223.0	0.94	11.6	38.8	2.66	2.13	3.69	433.0	4.17
Х – среднее значение					188.96	0.89	11.18	37.32	2.46	2.52	1.68	352.5	4.12*		
стандартное отклонение						0.04	0.01	0.04	0.04	0.04	0.05	0.15	0.09	0.04	

Примечание: значения X в графах 8–15 – средне-геометрические со стандартным отклонением [10], $Mw^* - c$ реднее арифметическое с соответствующей погрешностью; N+E – полный вектор колебаний, определенный по записям двух горизонтальных составляющих записи волны S.

2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Главный толчок 2 марта 2014 г. предварялся шестью форшоками энергетических классов $K_{\Pi} = 6.5-8.0$, произошедшими с 22 по 28 февраля на глубинах очагов $h=18-27 \ \kappa m$ [1]. Глубина основного толчка $h=28 \ \kappa m$, первого афтершока с $K_{\Pi}=8.5$, последовавшего через 15 часов – $h=26 \ \kappa m$. Энергетическая ступень между основным толчком и наиболее сильным форшоком составила 3 порядка ($\Delta K_{\Pi_{-}\phi op} = 3.2$), а между основным толчком и наиболее сильным афтершоком – около полутора порядков ($\Delta K_{\Pi_{-}\phi op} = 1.4$).

Активизация центральной зоны, в том числе за счет афтершоков землетрясения 2 марта в 03^h34^m, прослеживалась до 16 декабря (Рис. 3,а).

Непосредственно к серии афтершоков можно отнести землетрясения с 02.03.2014 г. по 20.06.2014 г., произошедшие вблизи эпицентра главного толчка с характерным для афтершоковых последовательностей спадом энергетического уровня (Рис. 3,а, штрих-линия) и малыми промежутками времени dT между событиями (Рис. 3,б). В форшоковый период dT составляли от 7 минут до 5 дней, а в афтершоковый – от 1 минуты до 17 дней.

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 [14]. Заметим, что закон Омори применим только для начального активного периода проявления афтершоков. В последующий период отмечаются нерегулярные флуктуации выделения энергии и интенсивности потока событий, что и характерно для рассматриваемой последовательности (Рис. 3,а).



Рис. 3. Изменение со временем: a – энергетического класса K_{Π} землетрясений центральной зоны региона (Ялтинский район, № 2) в течение 2014 г.; δ – промежутков времени dT (в днях) для последующих толчков до 20.06.2014 г.

Временной ход числа афтершоков *N*, происходящих в этот активный интервал времени *t*, можно описать уравнением прямой в двойном логарифмическом масштабе:

$$\lg N = -(1.48 \pm 0.15) \cdot \lg t + (1.21 \pm 0.06)$$
(2)

Коэффициент спада со временем потока повторных событий p составил 1.48±0.15, что больше преобладающего значения $p\approx 1$ для большинства афтершоковых последовательностей землетрясений Крыма [3] и Мира [15, 16].

Из всей совокупности событий, часть (61%) с низкими энергетическими классами K_{Π} =4.3–6.1 отчетливо записана только двумя станциями и не являются представительными. В связи с этим далее при исследовании пространственных свойств взаимосвязанных событий они не рассматривались.

Рассмотрим расположение в пространстве, группирующихся событий ($K_{\Pi} > 6$) (рис. 4). Первая группа афтершоков в период до 29 марта энергетических классов $K_{\Pi} > 6$ произошла севернее главного толчка на меньшей, чем основной толчок глубине вблизи зоны форшоков (рис. 4). Эпицентральное расстояние от г. Ялта Δ =8–24 км. С 06.04 по 27.04 возникла вторая группа очагов, расположенная южнее основного толчка в более глубоких слоях земной коры (h=22–28 км).

В целом общую очаговую зону всей последовательности группирующихся землетрясений ($K_{\Pi} > 6$) можно представить в виде эллипса с длиной большой оси

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 2014 ГОДУ

около 25 км, ориентированной субмеридионально в $Az \approx 20^{\circ}$ (Рис. 4,а, контур 2). При этом форшоки, располагаясь в верхней части общей очаговой зоны (Рис. 4,а, контур 1), заняли незначительную компактную площадь в виде эллипса, ориентированного диагонально ($Az \approx 330^{\circ}$). Интересно отметить практически полное соответствие ориентации всей очаговой зоны и зоны форшоков землетрясения 2 марта 2014 г. с магнитудой Mw = 4.1 и сложной последовательности разрушительного землетрясения 1927 г. с Mw=6.9, произошедшего в данной эпицентральной зоне с аналогичными географическими координатами [17, 18].



Рис. 4. Пространственное расположение очагов группирующихся землетрясений с $K_{\Pi} > 6$ центральной зоны Крыма в 2014 г.: a – карта эпицентров. Контуры: 1 – форшоков; 2 – всей зоны последовательности 02.03.2014 г.; δ , e – распределение по глубине, соответственно, вдоль направлений по широте и долготе:.1 – форшоки; 2 – афтершоки; 3 – главный толчок 02.03.2014 г. Кривыми линиями отмечены изобаты континентального склона.

По глубине очаги землетрясений также группировались в отдельные зоныкластеры (Рис. 46, в). Для наглядности рассмотрены сечения по глубинам вдоль географической широты (Рис. 4a) и долготы (Рис. 4б). Можно выделить три локализованные группы гипоцентров вдоль широтного направления (рис. 4б): форшоковая зона с тенденцией заглубления к северу под углом около $\alpha \approx 60^{\circ}$; южная часть афтершоков (вблизи основного толчка) с более пологим погружением к северу; и

северо западная группа афтершоков (вблизи форшоковой зоны) с наклонным падением с севера на юг.

В разрезе по глубине вдоль направления по долготе (Рис. 4*в*) выделяется две группы гипоцентров: форшоковая зона с крутым погружением ($\alpha \approx 70^{\circ}$) с востока на запад и афтершоковая – с более пологим погружением с запада на восток. В целом можно отметить, что разгрузка очаговой зоны после главного толчка шла снизу вверх, охватив значительный объем глубинной среды около 2500 км³. Это соизмеримо с размерами очаговой зоны землетрясения 12 апреля 2009 г. такого же энергетического уровня ($K_{\Pi} = 11.2$) [5].

Сейсмический режим. Для больших временных интервалов сейсмический режим близок к стационарному [19]. Для центральной зоны Крымского региона, где произошли рассматриваемые серии землетрясений кумулятивный график повторяемости за длительный период с 1955 по 2013 гг. описывается уравнением:

$$lgN = -(0.41 \pm 0.03) \cdot K_{\Pi} + (6.97 \pm 0.34), r = 0.95$$
 (3)

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 работе [3] было показано, что угловой коэффициент графика повторяемости у в форшоко-афтершоковый период группирующихся сейсмических событий зоны центральной Крымского региона значительно меньше среднего долговременного значения. Для последовательности группирующихся землетрясений 2014 г. по данным представительных землетрясений с $K_{\Pi} > 6$ построен кумулятивный график повторяемости (Рис. 5), который можно надежно аппроксимировать уравнением прямой:

$$lgN = -(0.30\pm0.01)\cdot K\pi + (3.35\pm0.10), r = 0.99$$
 (3)



Рис. 5. График повторяемости форшок-афтершокового периода землетрясений 2014 года.

Уравнения 2 и 3 получены методом ортогональной регрессии с высокими коэффициентами корреляции *r*, и малой погрешностью в оценке углового коэффициента *γ*, потому их сравнение корректно. Из сравнения следует, что в форшоко-афтершоковый период 2014 г. отмечено отклонение сейсмического режима от стационарного с заниженным значением углового коэффициента *γ*, как и для других группирующихся землетрясений центральной зоны Крыма [3].

Причина уменьшения значения γ в зоне сложных последовательностей может быть объяснена локализацией и увеличением объемного разрушения среды вдоль поверхности главного разрыва, когда среда становится более податливой для образования последующих крупных трещин.

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Характер и основные параметры сейсмических колебаний от землетрясений зависят главным образом от источника излучения (очага), характеристик глубинной среды на пути распространения и свойств подстилающих пород под станцией регистрации. В связи с этим по внешнему виду сейсмограмм невозможно вычесть эти факторы и решить обратную задачу по их идентификации. Но, если условно исключить влияние двух последних факторов, взяв, например, одну станцию регистрации и компактно расположенную группу очагов, то можно качественно оценить некоторые свойства источника.

Попытаемся таким способом рассмотреть волновые формы рассматриваемой последовательности 2014 года по записям станции «Ялта» (Рис. 6).

Визуальное сравнение волновых форм наиболее сильного форшока и афтершоков с записью основного толчка показывает, что первое движение в очагах было подобным – на станцию «Ялта» первой пришла волна разрежения (минус). В то же время, характер колебательного процесса во всех рассмотренных примерах различен, как в группе продольных, так и поперечных волн. Наиболее ярко различаются записи по вертикальной составляющей. Различные виды записи (Рис. 6) качественно указывают на различия и индивидуальные особенности физических процессов в отдельных очагах, связанных в пространственновременную последовательность землетрясений. Не исключено также влияние вариаций параметров модели среды в окрестности каждого очага и трассы на пути распространения сейсмических волн за счет различий в глубинах гипоцентров.

Рассмотрим также количественные параметры сейсмических колебаний, такие, как отношения амплитуд поперечных As и продольных волн Ap – волн (As/Ap) и отношения периодов колебаний в максимальных амплитудах (Ts/Tp) по данным станций «Ялта» и «Алушта» (Рис. 7, 8). Эти параметры характеризуют в основном источник излучения, очаг землетрясения и не зависят от энергии землетрясений и эпицентрального расстояния.



Пустовитенко Б. Г., Бондарь М. Н.

Рис. 6. Примеры сейсмограмм по станции «Ялта» группирующихся землетрясений 2014 г.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 2014 ГОДУ

На рисунке 7 заметна временная изменчивость параметров As/Ap: в форшоковый период на записях станций Ялта и Алушта отношения As/Ap значительно превосходят на только среднее долговременное равное четырем [20], но и среднее за период активизации очаговой зоны; в последующий период после главного толчка эти значения уменьшаются и становятся близкими к долговременным.



Рис. 7. Изменение отношений As/Ap для группы форшоков и афтершоков землетрясения 2 марта 2014 г. по записям сейсмических станций «Ялта» (*a*) и «Алушта» (б). Прямые линии – средние значения за рассматриваемый период. Цифры по оси Y – порядковый номер последовательных по времени землетрясений.

Отношения периодов (Ts/Tp), напротив, в форшоковый период были заниженными на обеих станциях (Рис. 8), а в афтершоковый – носили нерегулярный характер, то увеличиваясь, то уменьшаясь по отношению к среднему станционному значению.



Рис. 8. Изменение отношений *Ts/Tp* для группы форшоков и афтершоков землетрясения 2 марта 2014 г. по записям сейсмических станций «Ялта» (*a*) и «Алушта» (б).

Все это косвенно свидетельствует о том, что как предыдущие (форшоки), так и последующие толчки (афтершоки) имели свои индивидуальные особенности очаговых процессов, не унаследованные от главного толчка его основные черты.

Как показано в работе [21] для очага землетрясения, представляемого в виде круговой дислокации, максимум сейсмического излучения направлен вдоль разрыва и по нормали к нему для поперечных S-волн, а для продольных P-волн вдоль разрыва излучение минимальное. Исходя из этого, отношения амплитуд As/Ap может характеризовать близость или удаленность азимута той или иной станции регистрации по отношению к направлению разрыва в очаге. Рассмотрим азимутальное распределение As/Ap (рис. 9) для шести наиболее значимых землетрясений из рассматриваемой последовательности: форшока, главного толчка,

по два афтершока из южной (близи основного) и северной (вблизи форшока) локальных групп эпицентров (табл. 5).

Таблица 5.

	Mec.	Число	Час	Мин.	Сек.	φ°	λ°	h, км	Кп
форшок	2	22	22	18	48.3	44.38	34.41	23	8.0
осн.толчок	3	2	3	34	28.3	44.30	34.33	28	11.2
афтершок 1	3	2	18	10	25.9	44.26	34.34	26	8.5
афтершок 2	3	17	23	13	36	44.43	34.34	19	9.8
афтершок 3	3	29	5	41	21.1	44.44	34.33	19	8.6
афтершок 4	4	27	2	51	33.6	44.23	34.33	22	8.5

Основные параметры землетрясений, выбранных для анализа As/Ap (Az)



Рис. 9. Азимутальное распределение отношений *As/Ap* по станциям Крыма для землетрясений в соответствие с таблицей 5.

Несмотря на ограниченное количество станций регистрации и узкого диапазона азимутального распределения As/Ap, можно отметить максимум на графике As/Ap (Az°) в северном направлении (Az=0°-10°). Наиболее выраженный максимум отмечен для афтершока № 1, последовавшего сразу после основного толчка. К сожалению, колебания поперечных волн от основного землетрясения на станции «Алушта», расположенной в Az=8°, вышли за пределы сейсмограммы и на графике As/Ap (Az°) значения по ней отсутствуют. Можно только предположить, что это

произошло по причине близости азимутального расположения станции к направлению распространению разрыва. Это согласуется с простиранием одной из нодальных плоскостей в меридиональном направлении ($STK_{NP2}=184^{\circ}$). Для удаленного по времени афтершока \mathbb{N} 4 не выделено максимального значения на графике As/Ap (Az°).

выводы

Как показано в работе [3] очаговые зоны группирующихся землетрясений центральной зоны Крымского региона 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 $M_{\text{max}} = 6-6.5$ [22]. Взаимосвязанные землетрясения возникают преимущественно в пределах земной коры (h=15–32 км) района наибольшего градиента изобат континентального склона Черного моря. Рассматриваемая последовательность 2014 г. произошла в земной коре на глубине 28 км зоны сочленения Южно-Бережного и Ялтинского глубинных разломов в пределах очаговой зоны разрушительного землетрясения 11.09 1927 г. с $M_{\rm W}$ =6.9 [17, 18].

Главное землетрясение 2 марта 2014 года с магнитудой $M_W = 4.1$ произошло под действием горизонтальных растягивающих напряжений с подобным 11.09 1927 г. типом механизма очага. При этом одна из нодальных плоскостей (*NP2*) субвертикального простирания (*STK*=184°) соответствует азимуту направления большой оси эллипса афтершоков и ориентации изобат континентального склона в данном месте (Рис. 4). Кроме того, в этом направлении отмечены максимальные колебания поперечных волн и минимальные – продольных. В связи с этим плоскость *NP2* можно отнести к главной, по которой произошел косой сброс активного крыла разрыва с правосторонней компонентой смещения.

В процессе снятия напряжений в очаге ощутимого землетрясения 2 марта 2014 года была произведена работа, эквивалентная сейсмическому моменту $M_0=188\cdot10^{13}$ *H*·*м* для перемещения бортов разрыва на величину подвижки $\bar{u}=2.5$ *см*. При этом сброшенное напряжение $\Delta \sigma$, равное $11.18\cdot10^5$ *Па* (11 бар) превысило кажущееся по примерно в 4 раза за счет гладкого скольжения по разрыву ($\Delta \sigma_r = 1.68\cdot10$ *Па*), подготовленного серией форшоков.

Энергия дислокации *E*u в очаге радиусом $r_0=0.89 \ \kappa m$ составила $3.5 \cdot 10^{10} \ \beta m$, а деформация среды $\varepsilon = 37.3 \cdot 10^{-6}$.

Землетрясение предварялось форшоками и сопровождалось шлейфом афтершоков, частота возникновения которых уменьшалась со временем по закону Омори с коэффициентом спада 1.48.

Сейсмический режим в период активизации зоны существенно отличался от долговременного с угловым коэффициентом $\gamma = -0.41$. Для выборки представительных землетрясений форшок-афтершокового периода получено заниженное значение углового коэффициента $\gamma = -0.30$, как и для других группирующихся землетрясений центральной зоны Крыма [3].

Поле всей совокупности землетрясений представлено в виде эллипса, наибольшая ось которого ориентирована субмеридионально вдоль изобат

континентального склона и одной из нодальных плоскостей из решения механизма очага. Форшоки и афтершоки унаследовали некоторые черты основного толчка, но имели свои индивидуальные отличия и особенности.

По пространственному расположению очаговой зоны, типу подвижки в очаге, пространственно-временным свойствам сейсмических процессов форшокафтершокового периода связанная последовательность землетрясения 02.03.2014 года во многом подобна последовательности разрушительного землетрясения 11.09.1927 года, являясь его аналогом на другом, более низком, энергетическом масштабном уровне.

Список литературы

- Свидлова В. А., Калинюк И. В., Бондарь М. Н., Козиненко Н. М., Сыкчина З. Н. Сейсмичность Крыма в 2014 // Ученые записки Таврического национального университете им. В. И. Вернадского. География. 2014. Т. 27 (66). № 4. С. 7–69.
- 2. Mogi K. Some discussions on afterschoke, foreschoke and earthquake swarm the fracture of a someinfinite body caused by on inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. Bull. of the earthquakes. Res. Inst. Univ of Tokyo. 1963. Voll. 41. Part 3. pp. 615–640.
- 3. Пустовитенко Б. Г. Некоторые свойства сложных последовательностей землетрясений Крыма // Геодинаміка. 2011. № 2(11). С. 257–262.
- Пустовитенко Б. Г. Форосское землетрясение 18 октября 1998 года Мс=4.4; Мw=4.9, I₀=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 2009 г. //Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. С. 24–34.
- 6. Каменобродский А. Г., Пустовитенко Б. Г. Особенности группирования землетрясений Крымско-Черноморского региона // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 11. С. 25–32.
- Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2014 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: ГС PAH, 2014. URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2014/ (дата обращения 17.08.2019 г.).
- International Seismological Centre, On-line Bulletin [Electronic resource]. URL: http://www.isc.ac.uk. (дата обращения 17.08.2019).
- 9. Балакина Л. А., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. Москва: Наука, 1972. 198 с.
- Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
- 11. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal Geophysical Research. 1970. V. 75, no. 26, pp. 4997–5009.
- Аптекман Ж. Я., Белавина Ю. Ф., Захарова А. И., Зобин В. М., Коган С. Я., Корчагина О. А., Москвина А. Г., Поликарпова Л. А., Чепкунас Л. С. Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 66–79.
- 13. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2014 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Т 27 (66). № 4. С. 70–86.
- 14. Omori F. On aftershock of earthquakes // J. Coll. Sci. Univ. Tokyo. 1894. V. 7, pp. 111–200.
- 15. Utsu T., Ogata Y., Matsura R. S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // J. Phys. Earth. 1995. V.43, pp. 1–33.
- Татевосян Р. Э., Аптекман Ж. Я. Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений Мира // Физика Земли. 2008. № 12. С. 3–23.

- 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. Динамические параметры очагов разрушительных крымских землетрясений 1927 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2001 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003. С. 124–130.
- 19. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
- Пустовитенко Б. Г., Лущик А. В., Боборыкина А. В., Кульчицкий В. Е., Можжерина А. В., Насонкин В. А., Панков Ф. Н., Поречнова Е. Н., Пустовитенко А. А., Тихоненков Э. П., Швырло Н. Н. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. 264 с.
- 21. Москвина А. Г. исследование полей смещений упругих волн в зависимости от характеристик очага землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1969. № 9. С. 3–16.
- 22. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Борисенко Л. С., Поречнова Е. И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофизический журнал. 1999. Т. 21. № 6. С. 3–15.

SPATIAL-TEMPORARY PROPERTIES OF COMPLEX SEQUENCES OF

EARTHQUAKES OF THE CRIMEA IN 2014

Pustovitenko B. G., Bondar M. N.

Institute of seismology and geodynamics FSAEI HE Of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia E-mail: bpustovitenko@mail.ru

The spatio-temporal properties of a complex sequence of earthquakes associated with a tangible seismic shock on March 2, 2014 with a magnitude of $M_W = 4.1$ are considered.

The main earthquake occurred in the earth's crust of the South Coast fault under the action of tensile stresses. The type of movement in the source is the oblique-slip with the prevalence of the oblique component over the slip.

The earthquake was preceded by foreshocks and was accompanied by a plume of aftershocks, the frequency of which decreased over time according to Omori's law with a decline coefficient of 1.48. In the forshock-aftershock period of 2014, a deviation of the seismic regime from the long-term stationary one with an understated value of the angular coefficient of the recurrence graph γ was noted, as for other grouped earthquakes of the Central zone of the Crimea.

The field of the entire set of earthquakes is presented in the form of an ellipse, the largest axis of which is 25 km long, oriented submeridially along the isobaths of the continental slope and one of the nodal planes obtained from the focal mechanism of the main earthquake.

Foreshocks and aftershocks inherited some of the properties of the main shock, but had their own individual differences and features.

For the main shock on March 2, the dynamic parameters of the source are presented, which were refined taking into account the directivity of the radiation of seismic waves from the source: seismic moment $M_0 = 188 \cdot 10^{13}$, H m, circular dislocation radius $r_0 = 0.89$ km, displacement $\bar{u} = 2.5$ cm, discharged voltage $\Delta \sigma = 11.18 \cdot 10^5$, Pa, the dislocation energy Eu = $3.5 \cdot 10^{10}$, J, and the medium deformation $\epsilon = 37.3 \cdot 10^{-6}$. In this

case, the released stress $\Delta \sigma$ exceeded the apparent $\eta \sigma$ by about 4 times due to the smooth sliding along the gap prepared by the foreshocks.

In terms of the spatial location of the focal zone, the type of movement in the source, the spatiotemporal properties of the foreshock – aftershock seismic processes, the considered earthquake sequence of 03/02/2014 is similar to the sequence of the destructive earthquake of September 11, 1927, being its analogue at a lower energy level.

Key words: focal mechanism, groupability, foreshocks, aftershocks, Omori law, repeatability schedule, focal zone, dynamic focal parameters.

References

- 1. Svidlova V. A., Kalinyuk I. V., Bondar' M. N., Kozinenko N. M., Sykchina Z. N. Sejsmichnost' Kryma v 2014 godu (The seismicity of the Crimea in 2014). Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya Geografiya, 2014, V. 27(66), no/ 4, pp. 7–69 (in Russian).
- 2. Mogi K. Some discussions on afterschoke, foreschoke and earthquake swarm the fracture of a someinfinite body caused by on inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. Bull. of the earthquakes. Res. Inst. Univ of Tokyo, 1963, Voll. 41, Part 3, pp. 615–640 (in English).
- Pustovitenko B. G. Nekotorye svojstva slozhnyh posledovatel'nostej zemletryasenij Kryma (Some properties of complex sequences of Crimea earthquakes). Geodinamika, 2011, no 2(11), pp. 257–262 (in Russian).
- 4. Pustovitenko B. G. Forosskoe zemletryasenie 18 oktyabrya 1998 goda Mc=4.4; Mw=4.9, I₀=5 ballov (Krym) (Foros earthquake on October 18, 1998 Mc = 4.4; Mw = 4.9, I₀ = 5 points (Crimea)). Zemletryaseniya Severnoj Evrazii, Obninsk, GS RAN, 2004, pp. 240–248 (in Russian).
- Pustovitenko B.G., Porechnova E.I. Prostranstvenno-vremennye svojstva sejsmicheskogo processa v ochagovoj zone oshchutimogo zemletryaseniya v Krymu 12 aprelya 2009 g (The spatio-temporal properties of the seismic process in the focal zone of a significant earthquake in the Crimea on April 12, 2009). Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2009 god, Sevastopol, NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2011, pp. 24–34 (in Russian).
- Kamenobrodskij A. G., Pustovitenko B. G. Osobennosti gruppirovaniya zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (Features of the grouping of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). Izv. AN SSSR, Fizika Zemli, 1982, no. 11, pp. 25–32 (in Russian).
- Sejsmologicheskij byulleten' (ezhedekadnyj) za 2014 god /Otv. red. O. E. Starovojt. Obninsk: GS RAN, 2014. [Ehlektronnyj resurs]. URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2014/ (accessed: 17.08.2019).
- International Seismological Centre. On-Line Bulletin // International Seismological Centre. [Ehlektronnyj resurs]. URL: http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/2014/ (accessed: 17.08.2019).
- Balakina L. A., Vvedenskaya A. V., Golubeva N. V., Misharina L. A., Shirokova E. I. Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij (The field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of the centers of earthquakes). Moskow, Nauka, 1972, 198 p. (in Russian).
- 10. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma (Spectral and focal parameters of Crimea earthquakes), Kiev, Naukova dumka, 1990, 251 p. (in Russian).
- 11. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal Geophysical Research, 1970, Vol. 75, no. 26, pp. 4997–5009 (in English).
- 12. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zaharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. Spektry P-voln v zadache opredeleniya dinamicheskih parametrov ochagov zemletryasenij. Perekhod ot stancionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskih parametrov ochaga (Spectra of P-waves in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. The transition from station to focal range and the calculation of dynamic source parameters). Vulkanologiya i sejsmologiya, 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
- 13. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2014 goda (Spectral and dynamic parameters of the foci of 2014 Crimean



earthquakes). Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya Geografiya, 2014, Vol. 27(66), no. 4, pp. 70–86 (in Russian).

- 14. Omori F. On aftershock of earthquakes. J. Coll. Sci. Univ. Tokyo, 1894, Vol. 7, pp. 111-200 (in English).
- 15. Utsu T., Ogata Y., Matsura R. S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. J. Phys. Earth, 1995, Vol. 43, pp. 1–33 (in English).
- 16. Tatevosyan R. E., Aptekman ZH. YA. Etapy razvitiya aftershokovyh posledovatel'nostej sil'nejshih zemletryasenij Mira (Stages of development of aftershock sequences of the strongest earthquakes of the World). Fizika Zemli, 2008, no. 12, pp 3–23 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Aver'yanova V. I., Shebalin N. V. Osobennosti ochagovyh zon sil'nyh Krymskih zemletryasenij 11 sentyabrya i 26 iyulya 1927 goda (Features of the focal zones of the strong Crimean earthquakes of September 11 and July 26, 1927). Vopr. inzh. Sejsmologii, Vyp. 18, M., Nauka, 1976, pp. 103–114 (in Russian).
- Pustovitenko B. G. Dinamicheskie parametry ochagov razrushitel'nyh krymskih zemletryasenij 1927 g. (The dynamic parameters of the centers of the devastating Crimean earthquakes of 1927). Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2001 god, Sevastopol', NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2003, pp. 124–130 (in Russian).
- 19. Riznichenko Yu. V. Problemy sejsmologii (Seismology problems). M.: Nauka, 1985, 408 p. (in Russian).
- 20. Pustovitenko B. G., Lushchik A. V., Boborykina A. V., Kul'chickij V. E., Mozhzherina A. V., Nasonkin V. A., Pankov F. N., Porechnova E. N., Pustovitenko A. A., Tihonenkov E. P., Shvyrlo N. N. Monitoring sejsmicheskih processov v Krymsko-Chernomorskom regione (Monitoring of seismic processes in the Crimean-Black Sea region), Sevastopol, NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2014, 264 p. (in Russian).
- 21. Moskvina A. G. Issledovanie polej smeshchenij uprugih voln v zavisimosti ot harakteristik ochaga zemletryaseniya (Investigation of the displacement fields of elastic waves depending on the characteristics of the earthquake source). Izv.AN SSSR, Ser. Fizika Zemli, 1969, no. 9, pp. 3–16 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Borisenko L. S., Porechnova E. I. Obshchee sejsmicheskoe rajonirovanie territorii Kryma (OSR-98) (General seismic zoning of the territory of Crimea (OSR-98)). Geofizicheskij zhurnal, 1999, Vol. 21, no. 6, pp. 3–15 (in Russian).