

А. А. Пустовитенко, Б. Г. Пустовитенко**Новые данные о процессах в очаговой зоне ощутимого землетрясения 2 июля 1990 г. (Крым)***(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)*

Описано решение механизма очага ощутимого землетрясения в Крыму 2 июля 1990 г. в $0^{\text{h}}35^{\text{m}}50,9^{\text{s}}$ с $M_W = 4,25$. Сброс накопленных напряжений произошел под действием горизонтальных сил сжатия. Тип подвижки в очаге — взбросо-сдвиг с преобладанием взбросовой составляющей. Простирание нодальных плоскостей $NP1$ ($STK = 93^\circ$) совпадает с широтной ориентацией большой оси первой изосейсты ($Az = (90 \pm 5)^\circ$). С учетом направленности излучения из очага и переинтерпретации станционных амплитудных спектров уточнены значения сейсмического момента, радиуса дислокации и других очаговых параметров. По макросейсмическим данным оценены параметры гипоцентра.

На материковой части Крыма между городами Алушта и Судак 2 июля 1990 г. в $0^{\text{h}}35^{\text{m}}50,9^{\text{s}}$ произошло ощутимое землетрясение с энергетическим классом $K_{\Pi} = 10,9$ и максимально наблюдаемой интенсивностью 5 баллов в с. Приветное [1, 2].

Сильные и ощутимые землетрясения с эпицентрами на материковой части Крыма события довольно редкие, потому дополнительное ретроспективное изучение особенностей физических процессов, протекающих в их очаговых зонах, остается актуальным при решении различных задач геодинамики региона и разработки моделей очага и сейсмичности для оценки долговременной сейсмической опасности территории.

Ранее по спектрам записей поперечных волн на региональных станциях “Алушта” и “Казантип” были определены динамические параметры этого очага [2]. Отсутствие в то время данных о механизме очага не позволило корректно учесть поправку направленности излучения сейсмических волн на станции регистрации при расчете скалярного сейсмического момента и других очаговых параметров.

К настоящему времени собраны и проанализированы первичные записи волновых форм землетрясения 2 июля 1990 г., уточнены знаки первых вступлений продольных волн на сейсмические станции, оценена степень их достоверности и качества. Это позволило получить надежное решение механизма очага, откорректировать ранее полученные оценки динамических параметров и дополнительно рассчитать энергию образования дислокации в очаге и магнитуду по сейсмическому моменту.

Сейсмические колебания от землетрясения 2 июля 1990 г. были зарегистрированы всеми региональными сейсмостанциями Крыма и многими удаленными — на расстояниях до 8000 км. Результаты определения основных параметров землетрясения, по данным международных центров обработки данных (агентств), мало отличаются друг от друга [3], но не соответствуют региональной интерпретации в Крыму [1]. Так, опубликованные в [3] координаты эпицентров смещены к северо-востоку на расстоянии около 20 км по отношению к инструментальному эпицентру, полученному в Крыму. Наибольшие расхождения отмечены в оценке глубины очага (h): от 10 до 33 км. При этом $h = 33$ км обычно означает, что очаг находился в пределах земной коры (без точной привязки к глубине).

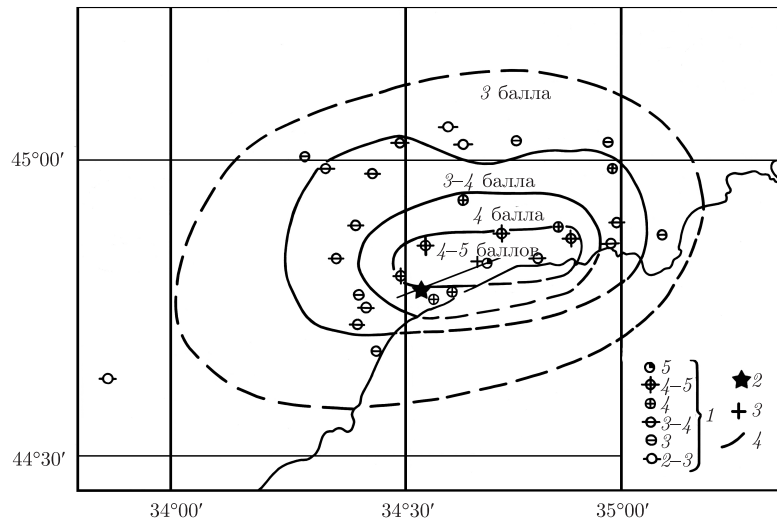


Рис. 1. Макросейсмическое поле землетрясения 2 июля 1990 г., по [2].

1 — Интенсивность в баллах; 2, 3 — инструментальный и макросейсмический эпицентр соответственно; 4 — изолинии зон балльности

При сводной обработке в Крыму использованы первичные сейсмограммы и только времена вступления прямых волн (P_g, S_g) и головных (P, S), для которых имеется надежный экспериментальный региональный годограф [4]. Использование только близких к очагу станций позволяет более уверенно фиксировать глубину очага. В связи с этим, для решения обратной задачи восстановления очаговых параметров по записям сейсмических колебаний за координаты гипоцентра землетрясения 2 июля 1990 г. приняты полученные в Крыму параметры: $\varphi = 44,78^\circ$; $\lambda = 34,53^\circ$; $h = 14$ км [1].

Макросейсмический эффект от землетрясения 2 июля был отмечен в 30-ти населенных пунктах Крыма [2] на расстояниях от инструментального эпицентра 3–55 км с интенсивностью от 5 до 2–3 баллов по шкале MSK-64 (рис. 1). Из рисунка видно, что первая и последующие изосейсты ориентированы в широтном направлении ($Az = (90 \pm 5)^\circ$). При этом длина большой оси высшей изосейсты составила около 50 км. В качестве макросейсмического эпицентра нами принят центр области распределения максимальных интенсивностей $I = 4-5$ баллов, совпадающий с населенным пунктом с. Приветное с географическими координатами: $\varphi = 44,82^\circ$; $\lambda = 34,67^\circ$. По отношению к инструментальному макросейсмический эпицентр расположен восточнее (в азимуте около 70°) на расстоянии 13 км.

С использованием макросейсмических данных получены также оценки глубины очага по формулам [5]:

$$I_0 - I_i = \frac{\nu}{2} \lg \left(1 + \frac{\Delta_i^2}{h^2} \right), \quad (1)$$

$$bM = I_0 + \nu \lg(h) - c, \quad (2)$$

где $I_0 = 5$; $I_i = 4-5$; $b = 1,5$; $\nu = 3,5$; $c = 3,0$; $\bar{\Delta} = 15$ км — среднее расстояние до 4–5-балльной изосейсты; h — глубина очага; $M = 3,4$ — магнитуда землетрясения, вычисленная из значения энергетического класса $K_{II} = 10,9$ по региональной формуле: $M = 0,57 K_{II} - 2,8$ [6].

При таких параметрах значения глубины очага землетрясения по формулам (1) и (2) составили соответственно 7,6 и 10,7 км при среднем округленном значении $h = (9 \pm 2)$ км.

Можно предположить, что процесс разрушения среды в очаговой зоне, вероятно, шел в северо-восточном направлении снизу вверх от начала точки разрыва (инструментального гипоцентра) на глубине 14 км до макросейсмического гипоцентра с $h = 9$ км, создав в эпицентральной зоне наибольший макросейсмический эффект с интенсивностью $I_0 = 5$ баллов.

Для решения механизма очага (табл. 1) использованы знаки первых вступлений продольных волн на сейсмические станции, окружающих очаг в широком азимутальном створе. Определение двух возможных положений поверхности разрыва и осей главных напряжений, действующих в очаге, проведено по стандартной методике [7] в рамках дислокационной модели “двойной диполь”. Углы выхода сейсмических волн определены для удаленных станций по годографу “ak135” [8], а для близких — по региональному годографу [4].

В соответствии с данными, представленными в табл. 1, землетрясение произошло под действием горизонтальных ($PLP = 8^\circ$) напряжений сжатия, ориентированных близмеридионально ($AZMP = 160^\circ$). Одна из нодальных плоскостей $NP1$ наклонная ($DP = 59^\circ$) имела близширотное простирание ($STK = 93^\circ$), а вторая $NP2$ с более пологим наклоном ($DP = 44^\circ$) — юго-западное ($STK = 221^\circ$). Тип подвижки по обеим нодальным плоскостям — правосторонний по $NP1$ и левосторонний по $NP2$ взбросо-сдвиг с преобладанием взбросовой составляющей (рис. 2).

Простирание одной из нодальных плоскостей $NP1$ ($STK = 93^\circ$) совпадает с широтной ($Az = (90 \pm 5)^\circ$) ориентацией первой изосейсты (см. рис. 1). В связи с этим данную плоскость подвижки можно принять как наиболее вероятную (главную).

С учетом параметров механизма очага для обоих видов движения активных блоков по $NP1$ и $NP2$ рассчитаны функции направленности излучения объемных волн из очага и поправки направленности излучения $R_{\theta\varphi}$ для реальных станций регистрации “Алушта” (ALU) и “Казантип” (KZN), записи которых использованы в данной работе.

Значения поправок направленности излучения $R_{\theta\varphi}$ S -волн землетрясения 2 июля 1990 г. на станциях ALU и KZN соответственно равны 0,45 и 0,58. Пример диаграммы направленности излучения при движении по плоскости $NP1$ иллюстрирует рис. 3.

Полученные поправки $R_{\theta\varphi}$ далее использованы для расчета динамических параметров очага, к которым относятся: M_0 — сейсмический момент; r_0 — радиус круговой дислокации; $\Delta\sigma$ — сброшенное напряжение; $\eta\sigma$ — кажущееся напряжение; $\Delta\sigma_r$ — радиационное трение; ε — деформация сдвига; $\bar{u}$ — средняя подвижка по разрыву; E_u — энергия образования дислокации в очаге; M_W — моментная магнитуда. Для определения этих параметров используются количественные связи между теоретическими моделями источников и основными характеристиками амплитудных спектров объемных волн. Нами использована дислокационная модель Бруна [9], в рамках которой удовлетворительно аппроксимируются амплитудные спектры записей землетрясений Крыма [10]. В модели Бруна спектр объемной волны можно описать с помощью трех основных характеристик: спектральной плотности $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$ ($T \rightarrow \infty$), угла наклона γ и угловой частоты f_0 или углового периода T_0 .

Спектральная плотность $\Omega_0(x, f)$ пропорциональна сейсмическому моменту M_0 , а угловая частота f_0 — размеру круговой дислокации с радиусом r_0 .

Спектр записи реального землетрясения в точке наблюдения является суперпозицией параметров источника, характеристики регистрирующего прибора, среды на пути очаг — станция, направленности излучения. Формула для расчета M_0 по стационарному спектру имеет вид

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

Таблица 1. Параметры механизма очага землетрясения 2 июля в 00 ч 35 м 50,9 с

Дата (г. мес. день)	t_0 (ч мин с)	h , км	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости								
			T			N			P			$NP1$			$NP2$		
			PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
1990 07 02	00 35 50,9	14	61	55	28	254	8	160	93	59	123	221	44	48			

Таблица 2. Спектральные и динамические параметры очага землетрясения Крыма 2 июля 1990 г.; $t_0 = 00$ ч 35 м 50,9 с; $\varphi = 44,78$; $\lambda = 34,53$; $h = 14$ км; $K_{II} = 10,9$

Станция	Волна (компонента)	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м · с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н · м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$u \cdot 10^{-2}$, м	$E_u \cdot 10^9$, Дж	M_W
ALU	S(N)	15	68,8	1,58	284	0,8	24,1	0,84	11,2	80,5	4,7	114	4,2
KZN	S(N)	127	23,8	1,4	346	0,9	20,5	0,69	9,5	68,2	4,5	118	4,3
	X				313	0,85	22,2	0,76	10,3	74,1	4,6	116	4,25*
	S				0,04	0,03	0,04	0,06	0,03	0,03	0,01	0,07	0,05*

* — Среднее арифметическое и соответствующая погрешность.

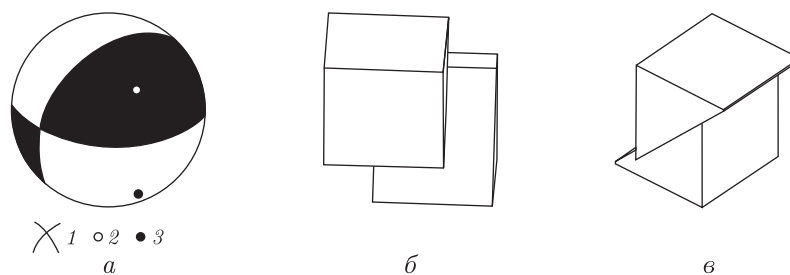


Рис. 2. Стереограмма механизма очага (нижняя полусфера) землетрясения 2 июля 1990 г.: *a* — по знакам первых вступлений *P*-волн; *б*, *в* — объемное представление механизма очага в виде движения активных блоков соответственно для *NP1* и *NP2* нодальных плоскостей.

1 — Нодальные линии; 2, 3 — оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; затемнена область волн сжатия

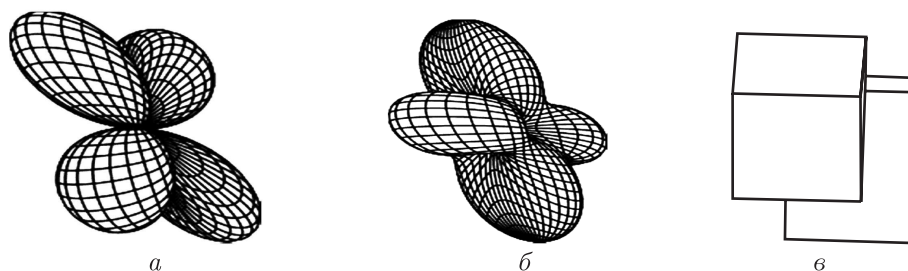


Рис. 3. Объемное представление направленности излучения волн *P* (*a*) и *S* (*б*) при землетрясении 2 июля 1990 г. в соответствии с решением механизма очага (вид сверху) для движения блоков по *NP1* (*в*)

где Ω_0 — максимальное значение спектральной плотности при $f \rightarrow 0$; V — скорость распространения сейсмической волны; ρ — плотность пород в окрестности очага; $R_\theta \varphi$ — направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ — поправка на геометрическое расхождение; $C(\omega)$ — частотная характеристика земной коры под станцией; $Sm(f)$ — поправка на неупругое затухание в мантии. Методика учета всех этих факторов при переходе от станционного спектра к спектру источника изложена в публикациях [10, 11].

Угловая частота спектра f_0 связана с длительностью импульса, излученного очагом, которая в свою очередь определяется размером источника, скоростью испарывания и положением точки наблюдения по отношению к источнику. Для дислокационной модели Бруна с разрывом в виде круга, радиус дислокации вычисляется по формуле:

$$r_0 = 2,34 \frac{V_P}{2\pi f_0}.$$

По значениям сейсмического момента M_0 и радиуса дислокации r_0 с использованием формул, приведенных в работах [9–13], определяются все другие динамические параметры очага (табл. 2).

Для переопределения очаговых параметров землетрясения 2 июля 1990 г. использованы амплитудные спектры аналоговых записей поперечных *S*-волн на сейсмических станциях Крыма: “Алушта” и “Казантип” [14]. Спектры и их новую интерпретацию в рамках модели Бруна иллюстрирует рис. 4.

В расчете скалярного сейсмического момента учтена поправка направленности излучения $R_\theta \varphi$ в соответствии с приведенными выше данными (см. с. 104). Результаты уточненных

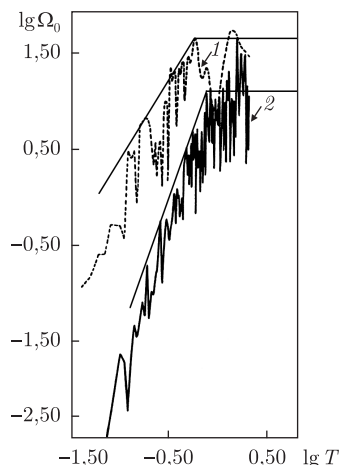


Рис. 4. Амплитудные спектры поперечных волн землетрясения 2 июля 1990 г. по записям аналоговых сейсмических станций: 1 — «Алушта»; 2 — «Казантип» и их аппроксимация в рамках модели Бруна

динамических параметров очага изученного землетрясения 2 июня 1990 г. демонстрирует табл. 2. Расчет среднего геометрического X и дисперсии S выполнен в [10], исходя из лог-нормального закона распределения величин.

Получена хорошая согласованность значений динамических параметров, восстановленных по записям двух станций регистрации (табл. 2). Средняя дисперсия для всех определяемых величин не превысила значение 0,07. Наилучшая сходимость результатов отмечена для средней подвижки по разрыву: $u = 4,6$ см ($S = 0,01$). Среднее значение скалярного сейсмического момента M_0 по двум определениям равно $331 \cdot 10^{13}$ Н · м с дисперсией $S = 0,04$, что соответственно обеспечило высокую точность в оценке моментной магнитуды $M_W = (4,25 \pm 0,05)$, рассчитанной по формуле Канамори [13]. Во время землетрясения были сброшены напряжения величиной $\Delta\sigma = 22,2 \cdot 10^5$ Па (22 бара) при кажущемся напряжении $\eta\sigma = 9,76 \cdot 10^5$ Па (~ 8 бар). При этом энергия, затраченная на образование дислокации в очаге радиусом $r_0 = 0,85$ км, составила $E_u = 116 \cdot 10^9$ Дж. Полученное положительное значение радиационного трения $\Delta\sigma_r = 10,3 \cdot 10^5$ Па указывает на гладкое скольжение берегов разрыва за счет равномерного распределения прочностных свойств среды и малой потери энергии на излучение короткопериодных волн [12]. Общий вклад в необратимую сеймотектоническую деформацию среды в зоне очага за счет данного землетрясения составил $\varepsilon = 74,1 \cdot 10^{-6}$. В целом, уточненные количественные значения динамических параметров очага землетрясения соответствуют таковым для других сейсмических событий Крыма эквивалентного энергетического уровня [10, 15].

Механизм очага землетрясения для материковой части Крыма, где сильные и ощутимые события происходят крайне редко, получен впервые. В связи с этим новые данные об очаговых параметрах имеют не только научную, но и практическую ценность для дальнейшего использования в задачах уточнения карт сейсмического районирования и моделирования прогнозных сейсмических воздействий. Новые знания об очагах помогут также приблизиться к пониманию геодинамических процессов, протекающих в геологических структурах этой части региона.

1. *Каталог* и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1990 г. / Сост. В.А. Свидлова // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым-Карпаты) за 1990 г. – Киев: Наук. думка, 1994. – С. 5–69.

2. Пустовитенко А. Н., Пантелеева Т. А. Землетрясения Крыма // Землетрясения в СССР в 1990 г. – Москва: ОИФЗ РАН, 1996. – С. 20–23.
3. International Seismological Centre, On-line Bulletin. – Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 1990. – <http://www.isc.ac.uk>.
4. Кульчицкий В. Е., Сафонова Г. П., Свидлова В. А. Годографы сейсмических волн Крымско-Черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым-Карпаты) за 1983 г. – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 94–103.
5. Шебалин Н. В. Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. – Москва: Наука, 1975. – С. 87–109.
6. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Горячин А. В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
7. 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.
8. Kennet B. L. N. Seismological Tables: ak135. – Australia, Canberra, ACT0200: Research School of Earth Sciences, Australian National Univ., 2005. – 80 p.
9. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**, No 26. – P. 4997–5009.
10. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наук. думка, 1990. – 249 с.
11. Аптекман Ж. Я., Белафина Ю. Ф., Захарова А. И. и др. Спектры Р-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.
12. Костров Б. Механика очага тектонического землетрясения. – Москва: Наука, 1975. – 179 с.
13. Hanks T. C., Kanamori H. A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**, No 35. – P. 2348–2350.
14. Пантелеева Т. А. Спектры и динамические характеристики очагов землетрясений Крыма за 1990 г. // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым-Карпаты) за 1990 г. – Киев: Наук. думка, 1994. – С. 167–179.
15. Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капитанова С. А., Поречнова Е. И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 238–242.

Отдел сейсмологии Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины, Симферополь

Поступило в редакцию 01.09.2014

А. А. Пустовітенко, Б. Г. Пустовітенко

Нові дані в осередковій зоні відчутного землетрусу 2 липня 1990 р. (Крим)

Описано рішення механізму осередку відчутного землетрусу в Криму 2 липня 1990 р. у $0^{\text{h}}35^{\text{m}}50,9^{\text{s}}$ с $M_W = 4,25$. Скидання нагромадження напруг відбулось під дією горизонтальних сил стиснення. Тип зрушення в осередку — підкидо-зсув з переважанням підкидової складової. Простягання подальших площин $NP1$ ($STK = 93^\circ$) збігається з широтною орієнтацією великої осі першої ізосейсти ($Az = (90 \pm 5)^\circ$). З урахуванням спрямованості випромінювання з осередку та переінтерпретації станційних амплітудних спектрів уточнено значення сейсмічного моменту, радіуса дислокації та інших осередкових параметрів. За макросейсмічними даними оцінено параметри гіпоцентра.

A. A. Pustovitenko, B. G. Pustovitenko

New data on the processes on the focus of the tangible earthquake on July 2, 1990 (Crimea)

A solution for the focal mechanism of the earthquake tangible in Crimea on July 2, 1990, 0^h35^m50.9^s, $M_W = 4.25$, is described. Resetting the accumulated stresses occurred under the influence of horizontal compression forces. The type of a slip at the focus is thrust-fault with a predominance of the thrusting component. The strike of nodal planes NP1 ($STK = 93^\circ$) coincides with a latitudinal orientation of the major axis of the first isoseist ($Az = (90 \pm 5)^\circ$). The values of seismic moment, radius of dislocation, and other focal parameters are defined more accurately with regard for the radiation directivity from the focus and the reinterpretation of station amplitude spectra. Parameters of the hypocenter are estimated by macroseismic data.