

ГИНДУКУШСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 3 марта 2002 г. с $M_w=7.3$, **$I_0=8$ (южнее Таджикистана)****Р.С. Михайлова¹, Т.Р. Улубиева², Л.С. Чепкунас¹**¹Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, raisa@gsras.ru²Институт сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Республики Таджикистан, г. Душанбе, anton_ulubiev@mail.ru

В Гиндукушской зоне глубокофокусных землетрясений Таджикистана 3 марта в 12^h08^m на глубине $h=180$ км произошло очень сильное землетрясение с $K_p=16.4$ [1], $M_w=7.3$ [2]. Несмотря на глубокий очаг, оно стало разрушительным. По данным NEIC [2], погибли, по меньшей мере, 150 человек, есть раненые. В Афганистане в провинции Саманган около 400 домов повреждены или разрушены оползнем, который перекрыл и затопил долину Суркундара. В Кабуле и Ростаге погибли, по меньшей мере, 13 человек. На территории Пакистана 3 человека погибли в Баяре. В Бадахшане и в провинции Тахар разрушены более 300 домов. Это землетрясение ощущалось на большей части территории Афганистана, Пакистана и Таджикистана. Также ощущалось в Индии и в провинции Хиньянг Китая. По данным MOS [3], в Душанбе – 6 баллов; в Узбекистане с интенсивностью 5 баллов ощущалось в Карши, Самарканде и Ташкенте; 4 балла – в Андижане и Намангане; в Кыргызстане оно вызвало сотрясения с интенсивностью 5 баллов в Оше, 4 балла – в Баткене, Суфи-Кургане, 3 балла – в Бишкеке; в Казахстане отмечены колебания с интенсивностью 3 балла в Чимкенте, Таразе и Джамбуле.

Параметры землетрясения 3 марта приведены в табл. 1 по данным сети сейсмических станций Таджикистана [4] и других сейсмологических служб.

Таблица 1. Основные параметры землетрясения 3 марта в 12^h08^m с $M_w=7.3$ по данным Таджикистана в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
Таджикистан	12 08 07		36.6	0.20	70.7	0.20	180		$K_p=16.4$	[1]
MOS	12 08 22.5		36.54		70.45		252		$MPSP=6.7/16$	[3]
ISC	12 08 18.0	0.53	36.50	0.033	70.52	0.036	209 233*	5.4 3.8*	$m_b=6.5/58$, h^* по pP - P	[2]
NEIC	12 08 19.7		36.50		70.48		226		$m_b=6.6/58$, $M_w=7.3$ $M_0=1.3 \cdot 10^{20}$ Н·м	[2]
HRVD	12 08 23.6		36.57	0.010	70.42	0.012	229	0.58	$M_w=7.3/57$, $M_0=1.3 \cdot 10^{20}$ Н·м	[2]
IDC	12 08 21.1		36.36		70.43		227	3.9	$m_b=6.3/21$	[2]

Как следует из табл. 1, значение широты эпицентра все шесть служб определили с небольшим разбросом и большая часть определений близка к таковому по обработке в Таджикистане. По долготе такой согласованности с обработкой Таджикистана нет: эпицентр по республиканским данным смещен на восток на 0.18 – 0.27° . И совсем большие и устойчивые различия в глубине гипоцентра – по республиканским данным $h=180$ км, все другие службы погружают его ниже в мантию на 29 – 72 км. Наиболее надежным из приведенных следует считать, по-видимому, определение глубины по обменным волнам в [2], соответствующее $h^*=233$ км. Однако время в очаге по республиканским данным меньше других определений на 11 – 16 с. Это не является ошибкой республиканских данных, а по республиканской сети зафиксировали начало группы из двух сильных толчков, т.е. время первого толчка. Второй толчок, более сильный,

оказался вблизи неразделим от первого, поскольку реализовался всего на 10 с позднее. При детальном анализе сведений бюллетеня ISC [2] были выявлены три ближайших форшока непосредственно вблизи главного толчка, параметры которых приведены в табл. 2 по данным трех агентств (MOS, ISC, IDC). Первые два реализовались 28 февраля и 1 марта и имели небольшие магнитуды в диапазоне $m_b=3.5-4.0$. Третий произошел уже 3 марта и, как указано, всего за 10–12 с до главного толчка и имел большую магнитуду m_b , варьирующую, по разным оценкам, в диапазоне $m_b=5.6-6.2$. Он был выделен как отдельный толчок лишь на телесеизмических расстояниях.

Таблица 2. Основные параметры трех близких форшоков землетрясения 3 марта в 12^h08^m18^s с $M_w=7.3$ по данным MOS, ISC, IDC

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
28 февраля в 06 ^h 49 ^m										
MOS	06 49 28.1		36.42		70.19		238		$MPSP=4.0/16$	[3]
ISC	06 49 28.0	0.47	36.34	0.035	70.41	0.060	241	5.7	$m_b=3.9/14$	[2]
IDC	06 49 28.8		36.33	70.36			238	13	$m_b=3.7/13$	[2]
1 марта в 07 ^h 28 ^m										
MOS	07 28 18.4		36.44		70.32		226		$MPSP=4.5/4$	[3]
ISC	07 28 17.5	0.61	36.43	0.064	70.33	0.076	214	9.1	$m_b=4.0/5$	[2]
IDC	07 28 18.7		36.46		70.44		212	16.2	$m_b=3.5/9$	[2]
3 марта в 12 ^h 06 ^m 06.7 ^s										
MOS	12 08 08.2		36.48		70.48		213		$MPSP=6.1/37$	[3]
ISC	12 08 06.7	0.27	36.47	0.018	70.45	0.017	251*	3.4*	$m_b=6.2/144$, h^* по $pP-P$	[2]
IDC	12 08 09.7		36.34		70.45		222	7.2	$m_b=5.6/23$	[2]

Различия в значениях параметров событий в табл. 2 по разным данным связаны прежде всего, с использованием разных сетей сейсмических станций. Поэтому для анализа пространственного развития непосредственно процесса разрыва в исследуемом очаге следует использовать сведения только из одного источника, в качестве которого выбраны данные Международного сейсмологического центра (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение параметров трех событий, предваряющих непосредственно главное землетрясение с $M_w=7.3$ по [2]

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км	
ISC – 28.02.	06 49 28.0	0.47	36.34	0.035	70.41	0.060	241	5.7	$m_b=3.9/14$
ISC – 01.03.	07 28 17.5	0.61	36.43	0.064	70.33	0.076	214	9.1	$m_b=4.0/5$
ISC – 03.03.	12 08 06.7	0.27	36.47	0.018	70.45	0.017	251*	3.4*	$m_b=6.2/144$, h^* по $pP-P$
ISC – 03.03.	12 08 18.0	0.53	36.50	0.033	70.52	0.036	233*	3.8*	$m_b=6.5/58$, h^* по $pP-P$

Из данных таблицы можно вычислить азимуты последовательных линий связи гипоцентров: для первых двух он составляет 324° и выражает движение на северо-запад с всплыванием гипоцентра на 27 км. Но далее линии связи разворачиваются на восток–северо-восток, т.к. последовательные азимуты составили 72° и 67° или в совокупности 70°. По глубине первоначально имеет место заглупление на 37 км, а затем в связке двух сильнейших толчков – всплывание на 18 км.

Что касается более ранних форшоков землетрясения 3 марта, то, по-видимому, можно говорить об их наличии [5], хотя с несколько меньшей уверенностью ввиду того, что, как отмечал Ч. Рихтер, Памиро-Гиндукушская зона уникальна по своей постоянной активности [6]. Согласно [5], общее их число составило $N=25$ в диапазоне $K_p=8.9-15$.

Землетрясение 3 марта весьма интересно тем, что оно сопровождалось значительной серией афтершоков ($N=368$ с $K_p=8.9-12.7$ [5]), что наблюдается только для сильных глубоких землетрясений. Действительно, в этой же очаговой зоне известны, по меньшей мере, четыре глубокофокусные землетрясения, произошедшие 14.03.1965 г. с $M=7.5$ [7, 8], 30.07.1974 г. с $M=7.3$ [9], 30.12.1983 г. с $M=7.1$ [10] и 09.08.1993 г. с $M=6.3$ [11], которые сопровождалась афтершоками.

Распределение во времени глубоких землетрясений до и после главного события 3 марта (рис. 1) построено в его очаговой зоне в пределах объема с $\varphi=36.6\pm 0.3^\circ$, $\lambda=70.7\pm 0.3^\circ$, $h=180\pm 30$ км на основе списка его форшоков и афтершоков в [5].

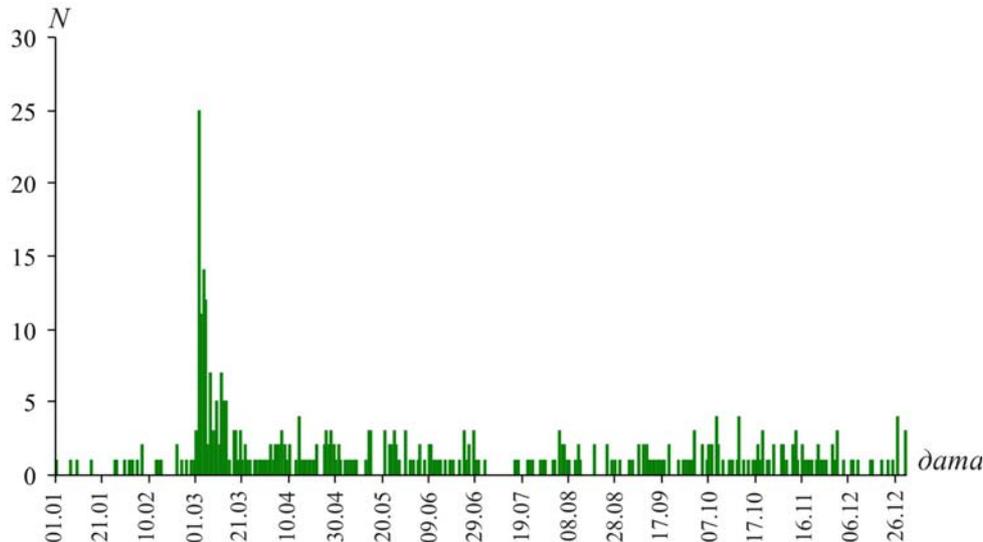


Рис. 1. Распределение во времени числа форшоков и афтершоков Гиндукушского землетрясения 3 марта в $12^{\text{h}}08^{\text{m}}$ с $M_w=7.3$

Как следует из рис. 1, процесс активизации до конца 2002 г. не завершился, поскольку уровень фона после землетрясения 3 марта значительно выше предшествующего. И это понятно, т.к. события такого уровня магнитуды, «потрясшие» громадные территории, вызывают значительное и длительное изменение «сейсмического климата» в их пределах. Энергия землетрясения составила $E=25.12 \cdot 10^{16}$ Дж. Суммарная энергия всех форшоков и афтершоков, равная $\Sigma E_{\text{ф}}=0.83 \cdot 10^{12}$ Дж и $\Sigma E_{\text{аф}}=2.04 \cdot 10^{13}$ Дж соответственно, меньше энергии главного толчка $3.0 \cdot 10^5$ и в $1.2 \cdot 10^4$ раз соответственно.

Карты эпицентров форшоков и афтершоков для землетрясения 3 марта изображены на рис. 2. Облако всех форшоков площадью 1590 км^2 вытянуто в северо–северо-восточном направлении, азимут его осевой линии равен $AZM=35^\circ$. Длина продольной оси – $l=65$ км, поперечной – $b=36$ км. Эпицентр будущего главного толчка 3 марта лежит слева от области форшоков, напротив средней его части. Облако афтершоков занимает в плане площадь размером 4860 км^2 , длина продольной оси – $l=95$ км с азимутом $AZM=53^\circ$, поперечной – $b=62$ км. Основной толчок находится почти в центре облака афтершоков. Наиболее близкие афтершоки образовали компактную группу в пределах площади, ограниченной координатами $36.3-36.7^\circ\text{N}$, $70.4-70.8^\circ\text{E}$ и глубинами очагов от 180 до 210 км.

Вступление исследуемой очаговой зоны в Гиндукуше в активную фазу началось, однако, не 3 марта, а еще двумя месяцами раньше. 3 января в 55 км юго-западнее и на 80 км выше по глубине произошло достаточно сильное ($K_p=14.3$, $M_w=6.1$) землетрясение. По данным NEIC [2], оно ощущалось в Пакистане (Исламабаде, Лахоре, Мультиане, Пешаваре и Равалпинди) и в Северо-западной Индии. По данным MOS [3], это землетрясение вызвало сотрясения в Таджикистане с интенсивностью 5 баллов в Душанбе и 4–5 баллов – в Хороге и Джерино. На территории Узбекистана были зафиксированы сотрясения с $I=3-4$ балла в Самарканде, 3 балла – в Джизаке и Карши, 2–3 балла – в Ташкенте. В табл. 4 приведены его параметры по данным Таджикистана и других служб.

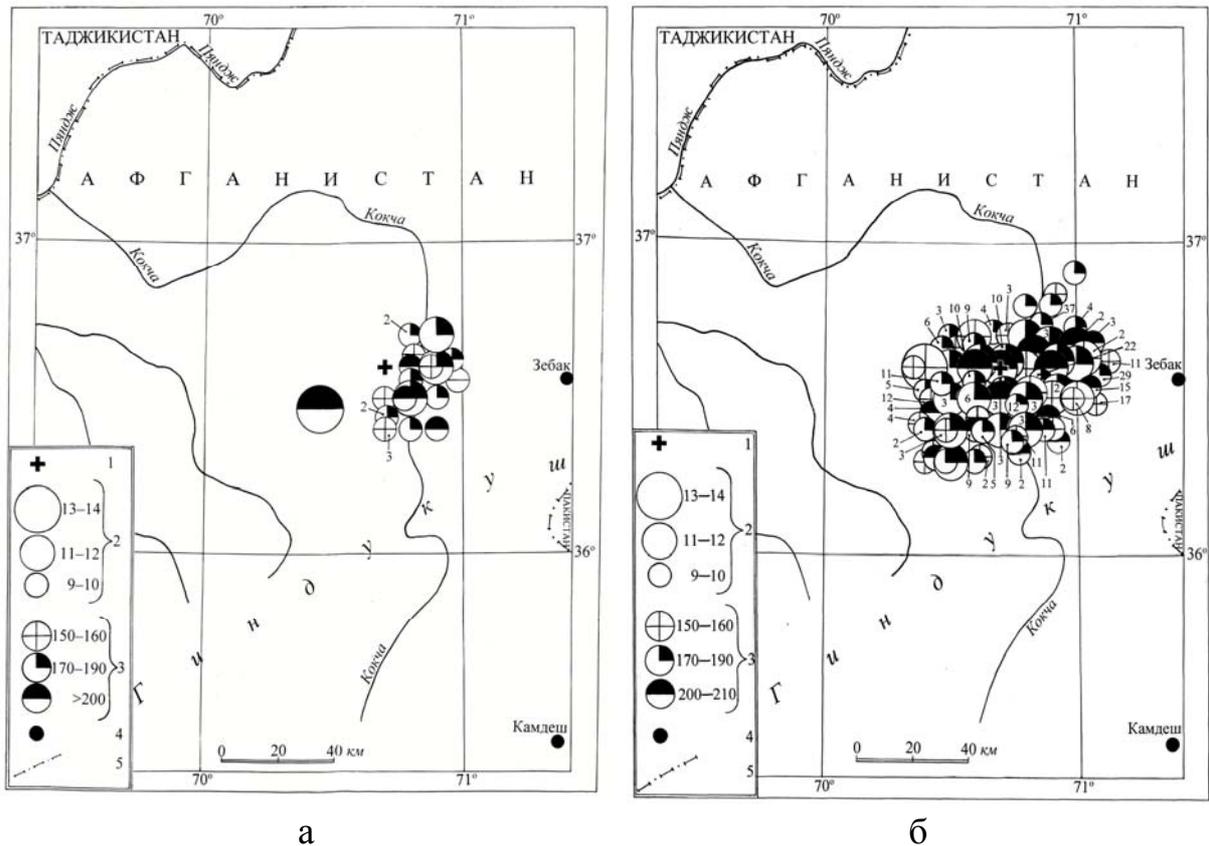


Рис. 2. Карты эпицентров 25-ти форшоков $K_p=8.9-15$ (а) и 368-ми афтершоков с $K_p=8.9-12.7$ (б) Гиндукушского землетрясения 3 марта в $12^{\text{h}}08^{\text{m}}$ с $M_w=7.3$

1 – инструментальный эпицентр; 2 – энергетический класс K_p ; 3 – глубина h гипоцентра, км; 4 – населенный пункт; 5 – государственная граница. ($N=368$ с $K_p=8.9-12.7$.)

Таблица 4. Основные параметры землетрясения 3 января в $07^{\text{h}}05^{\text{m}}$ $M_w=6.1$ по данным Таджикистана в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					Магнитуда		Источник
			φ°, N	$\delta\varphi^\circ$	λ°, E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
Таджикистан	07 05 32		36.3	0.10	70.4	0.10	100		$K_p=14.3$	[1]
MOS	07 05 27.7		36.11		70.71		126		$MPSP=6.0/35$	[3]
ISC	07 05 26.1	0.2	36.04	0.018	70.68	0.016	115 128*	2.9 0.8*	$m_b=5.9/194 h^*$ по $pP-P$	[2]
NEIC	07 05 27.7		36.09		70.69		129		$m_b=5.8, M_w=6.2$ $M_0=1.9 \cdot 10^{18} \text{ H}\cdot\text{м}$	[2]
HRVD	07 05 31.1		35.71	0.02	70.76	0.025	123	0.8	$M_w=6.1/44,$ $M_0=1.5 \cdot 10^{18} \text{ H}\cdot\text{м}$	[2]
ВЛ	07 05 27.2		36.09		70.69		115		$m_b=5.9$	[2]

Из табл. 4 следует, что эпицентр, полученный по данным Таджикистана, смещен относительно других решений к северо-западу, а глубина гипоцентра получена меньшей на 15–29 км.

Землетрясение 3 января имело три форшока и сопровождалось небольшой ($N=15$) серией афтершоков, список которых дан в табл. 5. При этом все три форшока имели заметно большие глубины, нежели главный толчок, а афтершоки возникали последовательно, с все большим заглублением, снижаясь собственно к слою, где реализовалась катастрофа 3 марта. Однако самое удивительное свойство всей совокупности афтершоков землетрясения 3 января состоит в том, что они не перекрываются с очаговой зоной землетрясения 3 марта, оставаясь целиком юго-западнее от нее.

Таблица 5. Основные параметры главного толчка, форшоков и афтершоков землетрясения 3 января в 07^h05^m с $K_p=14.3$, $M_w=6.1$

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p	№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p
			φ° , N	λ° , E						φ° , N	λ° , E		
Форшоки													
1	02.01	23 09 43	36.3	70.3	140	9.2	4	14.01	20 28 31	36.4	70.4	160	10.4
2	02.01	17 08 01	36.4	70.6	200	9.6	5	15.01	14 11 17	36.5	70.6	180	10.7
3	03.01	05 59 17	36.2	70.2	130	9.9	6	25.01	01 41 14	36.2	70.3	100	9.6
Основной толчок													
	03.01	07 05 32	36.3	70.4	100	14.3	7	29.01	17 49 07	36.5	70.4	200	11.4
Афтершоки													
1	04.01	15 00 41	36.3	70.4	100	9.4	8	01.02	15 03 48	36.1	70.3	120	9.8
2	04.01	15 22 49	36.1	70.5	140	10.0	9	02.02	09 57 25	36.4	70.5	150	9.0
3	04.01	22 11 35	36.5	70.5	150	11.5	10	04.02	03 10 15	36.4	70.5	170	10.9
							11	05.02	01 20 17	36.5	70.6	170	9.9
							12	09.02	12 05 35	36.5	70.4	180	8.8
							13	20.02	01 38 32	36.4	70.5	200	10.5
							14	24.02	01 50 53	36.4	70.5	130	9.8
							15	01.03	17 33 20	36.4	70.5	150	8.8

Для самого сильного события 3 марта с $M_w=7.3$, предваряющего его землетрясения 3 января с $M_w=6.1$, и трех афтершоков из очаговой зоны первого из них, произошедших 3 сентября в 17^h26^m с $M_w=5.1$, 29 сентября в 17^h02^m с $M_w=5.1$ и 1 октября в 02^h51^m с $M_w=5.2$, в Гарвардском центре США получены решения механизма очагов методом ТМЦ [2], приведенные в табл. 6.

Таблица 6. Параметры механизмов очагов пяти землетрясений, включая землетрясение 3 марта в 12^h08^m с $M_w=7.3$ (метод ТМЦ по HRVD из [2])

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды		K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агент-ство
				M_w	$\wedge MPSP$ # m_b		T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
1	03.01	07 05 30.1	123	6.1	$\wedge 6.0$ #5.9	14.3	70	344	8	232	18	139	216	27	72	56	64	99	HRVD
2	03.03	12 08 23.6	229	7.3	$\wedge 6.7$ #6.5	16.4	67	22	2	287	23	196	282	22	85	108	68	92	HRVD
3	03.09	17 26 57.7	224	5.1	$\wedge 4.8$ #4.8	12.7	50	330	35	116	18	218	348	41	150	102	71	53	HRVD
4	29.09	17 02 47.5	143	5.1	$\wedge 5.0$ #5.0	12.8	79	295	10	99	3	189	290	43	105	90	49	76	HRVD
5	01.10	02 51 25.9	161	5.2	$\wedge 5.1$ #4.9	12.7	7	288	42	25	47	190	342	52	-147	230	65	-42	HRVD

Наиболее важное из них событие 3 марта с $M_w=7.3$ произошло под действием преобладания сжимающих напряжений ($PL_p=23^\circ$, что меньше $PL_T=67^\circ$), ориентированных в юго-юго-западном направлении ($AZM_p=196^\circ$). Обе нодальные плоскости простираются в одном направлении (рис. 6) – с запада-северо-запада на восток-юго-восток ($STK_1=282^\circ$, $STK_2=108^\circ$). Тогда ориентация истинной плоскости разрыва в очаге определяется однозначно. Тип подвижки по пологой ($DP=22^\circ$) плоскости $NP1$ – надвиг с компонентами левостороннего сдвига, по крутой ($DP=68^\circ$) плоскости $NP2$ – практически «чистый» взброс. Нужно сказать, что как осевая линия области форшоков, так и области афтершоков, скорее всего, ориентированы на северо-восток, т.е. не поддерживают ориентацию нодальных плоскостей и вследствие этого не могут быть использованы для выбора истинной плоскости. В его очаге остаются равновероятными и сброс, и надвиг, хотя, с другой стороны, и в том и другом случае имеем в очаге восходящее движение. Следует отметить, что подобный механизм очага (подобная ориентация сжимающих и растягивающих напряжений) отмечен для сильнейшего Гиндукушского глубокофокусного землетрясения 14.03.1965 г. с $M=7.5$.

Предваряющее землетрясение 3 января с $M_w=6.1$ также произошло под действием преобладающих напряжений сжатия ($PL_p=18^\circ$, что меньше $PL_T=70^\circ$), ориентированных в юго-

восточном направлении ($AZM_p=139^\circ$). Нодальные плоскости $NP1$, $NP2$ имеют близкое простирание – с юго-запада на северо-восток ($STK_1=216^\circ$, $STK_2=56^\circ$). Подвижка по пологой ($DP=27^\circ$) плоскости $NP1$ – надвиг с компонентами левостороннего сдвига, по крутой ($DP=64^\circ$) плоскости $NP2$ – взброс с компонентами правостороннего сдвига. В общем, тип подвижки по обеим плоскостям, в принципе, близок к таковому в очаге главного толчка с $M_w=7.3$.

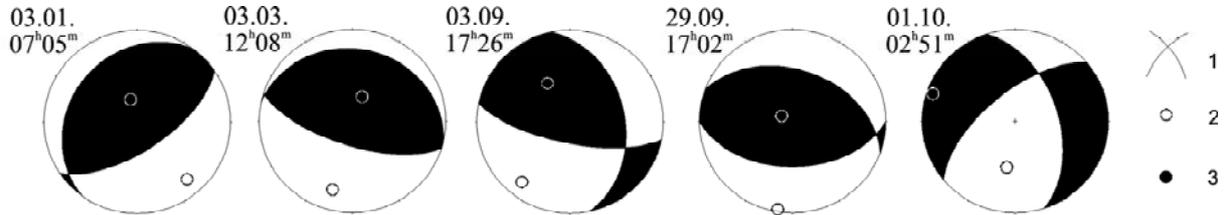


Рис. 3. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений 3 января в 07^h05^m с $M_w=6.1$, 3 марта в 12^h08^m с $M_w=7.3$, 3 сентября в 17^h26^m с $M_w=5.1$, 29 сентября в 17^h02^m с $M_w=5.1$ и 1 октября в 02^h51^m с $M_w=5.2$ за 2002 г.

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернена область волн сжатия.

В очагах двух афтершоков в сентябре, 3 и 9 сентября, также присутствуют подвижки типа взброс по плоскости $NP2$ для первого из них (с компонентами правостороннего сдвига) и по обеим плоскостям – для второго, но с компонентами правостороннего сдвига по $NP1$ и левостороннего – по $NP2$.

Но в очаге землетрясения 1 октября с $M_w=5.2$ преобладали растягивающие напряжения ($PL_T=7^\circ$, что значительно меньше $PL_p=47^\circ$), северо-западного направления ($AZM=288^\circ$). Обе нодальные плоскости имеют достаточно близкое по величине, но крутое падение ($DP_1=52^\circ$, $DP_2=65^\circ$). Тип движения по обеим плоскостям – сдвиг (по $NP1$ – правосторонний, по $NP2$ – левосторонний) с компонентами сброса, что не согласуется с движениями в очагах четырех первых землетрясений. Возможно, его не следует относить к афтершокам землетрясения 3 марта.

Л и т е р а т у р а

1. Улубиева Т.Р. (отв. сост.), Рислинг Л.И., Давлятова Р., Хусейнова Г.А., Михайлова Р.С., Улубиев А.Н., Максименко Т.И. Таджикистан. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
2. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2002.** – Berkshire: ISC, 2003–2004.
3. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2002 год /** Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2002–2003.
4. Улубиева Т.Р., Михайлова Р.С., Рислинг Л.И. Таджикистан. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.)
5. Улубиева Т.Р., Михайлова Р.С. Форшоки и афтершоки глубокого Гиндукушского землетрясения 3 марта 2002 г. с $M_w=7.3$. (См. раздел VIII (Дополнительные данные) в наст. сб. на CD).
6. Рихтер К.Ф. Элементарная сейсмология. – М.: ИЛ, 1963. – 670 с.
7. Астафьева Е.Г., Горбунова И.В. и др. Землетрясения Средней Азии // Землетрясения в СССР в 1965 году. – М.: Наука, 1967. – С. 44–70.
8. Леонов Н.Н., Иодко В.К. и др. Землетрясение в Северном Афганистане 14 марта 1965 г. // Землетрясения в СССР в 1965 году. – М.: Наука, 1967. – С. 77–86.
9. Уломов В.И., Фадинова Р.П. и др. Землетрясения Средней Азии // Землетрясения в СССР в 1974 году. – М.: Наука, 1977. – С. 49–98.
10. Баринаева А.Я., Шакирджанова Г.Н. и др. Землетрясения Средней Азии // Землетрясения в СССР в 1983 году. – М.: Наука, 1986. – С. 45–61.
11. Саломов Н.Г., Улубиева Т.Р., Рислинг Л.И., Шакирджанова Г.Н., Джураев Р.У. Таджикистан за 1993–1995 годы // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 49–58.