

КУХ-ЗАРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 27 августа 2010 г. с $K_p=13.8$, **$M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Эльбурский район Копетдага)****Н.В. Петрова**Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, petrova@gstras.ru

27 августа в 19^h23^m на севере Центрального Ирана, в 52 км к югу от иранского г. Дамган, произошло землетрясение с $K_p=13.8$, $M_w=5.8$. С максимальной интенсивностью $I=7$ баллов по модифицированной шкале Меркалли оно проявилось в селе Кух-Зар (рис. 1, 2), поэтому в публикациях именуется как «Кух-Зарское» [1, 2] или «Дамганское» [3]. Макросейсмические последствия землетрясения тщательно обследованы и проанализированы совместно с записями семи станций иранской сети сильных движений грунта сотрудниками Международного института сейсмостойкого строительства и сейсмологии, Тегеран, Иран [1]. Согласно [1], в течение последних нескольких десятилетий территория вокруг очаговой зоны Кух-Зарского землетрясения не раз подвергалась воздействию землетрясений аналогичной величины, но Кух-Зарское землетрясение вызвало наиболее высокий уровень ущерба из-за плохого качества не армированных и перегруженных конструкций, выполненных из необожженного кирпича или каменной кладки построек с использованием только местных материалов. Лишь благодаря тому, что эпицентр Кух-Зарского землетрясения располагался в малонаселенной местности, оно повлекло за собой только несколько жертв. Погибли 4 человека, ранено 40, разрушено или повреждено более 350 домов в 12 близлежащих селах, включая Кух-Зар, более 800 человек остались без крова.

Параметры Кух-Зарского землетрясения и его крупнейшего афтершока 28 августа в 00^h29^m с $K_p=12.8$, определенные различными сейсмологическими службами, представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. Основные параметры Кух-Зарского землетрясения 27 августа 2010 г. в 19^h23^m с $K_p=13.8$ и его афтершока 28 августа в 00^h29^m с $K_p=12.8$ по данным Государственной сейсмологической службы Туркменистана (КОП) и других агентств

Агентство, число станций	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					Магнитуда	Ис- точ- ник
			φ° , N	λ° , E	δ , км	h , км	δh , км		
Главный толчок									
КОП, $n=19$	19 23 48.0		35.45	54.55	35			$MPVA=6.3/14$, $K_p=13.8$	[4]
MOS, $n=204$	19 23 50.3	1.03	35.57	54.49	4.4	34.0		$MS=5.4/68$, $MPSP=5.7/81$	[5]
ISC, $n=1946$	19 23 48.9	0.1	35.49	54.50	3.7	12.5	1.6	$M_s=(5.5\pm 0.2)/219$, $m_b=(5.6\pm 0.2)/366$	[5]
ISCJB, $n=1944$	19 23 45.6	0.31	35.51	54.53	2.4	0.7	2.0	$h_{pP}=13$ км	
NEIC	19 23 48.0		35.46	54.55		15.0		$M_s=5.5/144$, $m_b=5.6/151$, $ME=6.1$, $E=3.8\cdot 10^{13}$ Дж, $M_w=5.8$, $M_0=5.18\cdot 10^{17}$ Н·м	[5]
THR, $n=18$	19 23 48.0	1.16	35.46	54.49	3.9	14.1		$ML=5.9$	[5]
TEH, $n=19$	19 23 49.5	1.16	35.49	54.47		6.7		$ML=Mn=5.9$	[5, 6]
GCMТ, $n=116$	19 23 49.5	0.1	35.53	54.49	1.1	14.9	0.7	$M_w=5.8/116$	[5]
CSEM, $n=497$	19 23 48.2	0.08	35.52	54.57	2.8	10f		$M_s=5.6$, $m_b=5.8/52$, $M_w=5.7$	[5]
Афтершок									
КОП, $n=17$	00 29 01.0	1.61	35.80	54.20	35			$MPVA=5.2/17$, $K_p=12.8$	[4]
MOS, $n=135$	00 29 06.4	1.61	35.71	54.59	4.8	25		$MPSP=5.0/43$	[5]
ISC, $n=803$	00 29 06.4	0.42	35.52	54.50	3.5	14.2	2.6	$M_s=(4.0\pm 0.1)/24$, $m_b=(4.8\pm 0.2)/111$	[5]
ISCJB, $n=803$	00 29 02.8	0.54	35.57	54.59	3.8	2.8	3.6	$h_{pP}=24.4$ км	
THR, $n=17$	00 29 03.9	1.23	35.47	54.47	5.7	15.0	8.3	$ML=5.2$	[5]
TEH, $n=18$	00 29 05.3	1.16	35.49	54.44		6.1		$ML=Mn=5.0$	[5, 6]
CSEM, $n=189$	00 29 04.0	0.14	35.51	54.52	5.4	2.0		$m_b=5.1/21$	[5]

Как видно из рис. 1, разные решения эпицентра Кух-Зарского землетрясения по инструментальным данным сгруппированы довольно компактно и локализованы на расстояниях 2–15 км к северо-западу от макросейсмического эпицентра ($\varphi_M=35.450$ N, $\lambda_M=54.566^\circ$ E), за который принят центр 7-балльной изосейсты, приведенной в [1]. Самые близкие к макросейсмическому эпицентру решения получены КОП и NEIC (~2 км), самые далекие – MOS (~15 км) и другими агентствами (например, NNC), данные которых не включены в табл. 1.

Глубину гипоцентра по сейсмограммам туркменских станций определить не удалось, т.к. блочные годографы [7], с помощью которых в Туркменистане автоматически обрабатываются записи землетрясений для локация гипоцентра, не включают территорию Северного Ирана в районе гипоцентра из-за отсутствия сведений о ее глубинном строении. Обработка сейсмограмм и локация эпицентра произведены по осредненному годографу Розовой [8].

Решения для гипоцентра по данным телеметрических сетей Международного института сейсмостойкого строительства и сейсмологии Министерства науки Ирана (THR) и Института геофизики Тегеранского университета (ТЕН), полученные в азимутальном створе 273° и диапазоне эпицентральных расстояний 50–477 км по записям небольшого числа станций (17 и 18 соответственно), не представляются более надежными, чем, например, решения ISC или CSEM, т.к. последние используют гораздо большее число станций, включая иранские (табл. 1).

Наиболее надежной из представленных в табл. 1 инструментальных глубин можно считать глубину по фазе волн pP , $h_{pP}=13$ км по данным ISBJB (данные ISC с обработкой по годографу Джеффриса-Буллена), которая близка к значениям глубины главного толчка в бюллетенях ISC, GCMT, NEIC, THR.

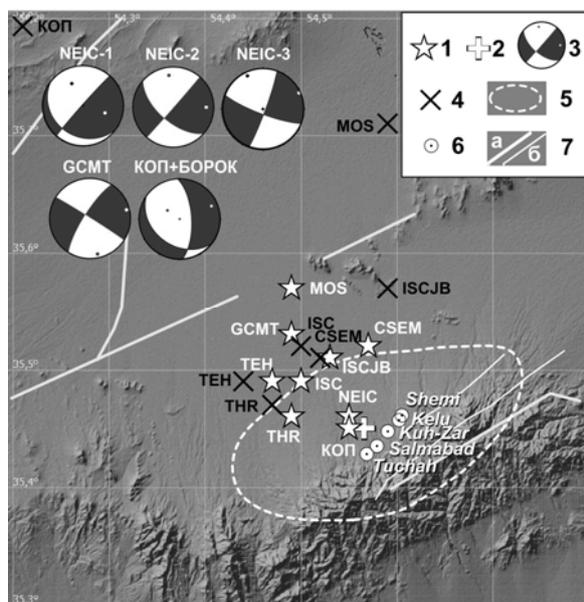


Рис. 1. Положение главного толчка Кух-Зарского землетрясения 27 августа в $19^{\text{h}}23^{\text{m}}$ с $K_p=13.8$ и его крупнейшего афтершока, 28 августа в $00^{\text{h}}29^{\text{m}}$ с $K_p=12.8$, по данным разных сейсмологических служб

1, 2, 3 – инструментальный, макросейсмический эпицентр и механизм очага главного толчка по [5, 9]; 4 – инструментальный эпицентр афтершока 28 августа; 5 – положение 7-балльной изосейсты согласно [1]; 6 – ближайшие села, где главный толчок ощущался с интенсивностью 7 баллов [1]; 7 – разломы по Берберяну [10] и [1].

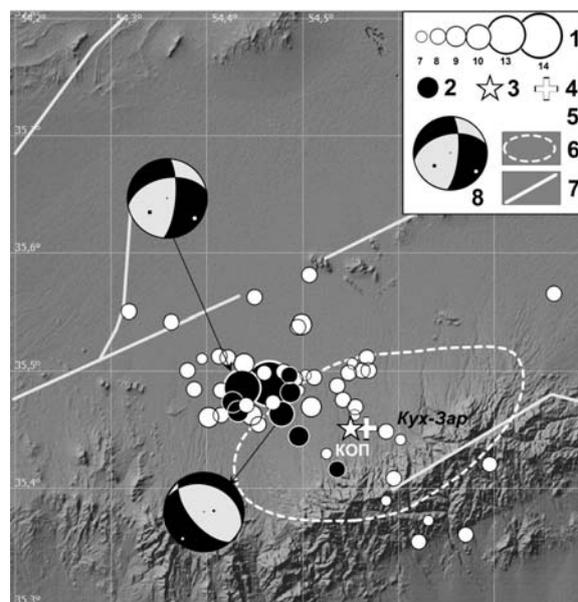


Рис. 2. Главный толчок и афтершоки Кух-Зарского землетрясения с 27 августа по 31 декабря 2010 г.

1 – расчетный по формуле $K=1.915 ML_{(ТЕН)}+2.68$ из [11] энергетический класс; 2 – афтершоки, локализованные в хорошем азимутальном створе ($AZM=265-283^\circ$); 3 – инструментальный эпицентр главного толчка по данным сейсмических станций Туркменистана (КОП); 4 – макросейсмический эпицентр: $\varphi_M=35.450$ N, $\lambda_M=54.566^\circ$ E; 5 – село Кух-Зар; 6 – положение 7-балльной изосейсты по [1]; 6 – 7-балльная изосейста из [1]; 7 – разломы по Берберяну [10]; 8 – механизмы очагов афтершоков 28 августа в $00^{\text{h}}29^{\text{m}}$ с $K_p=13.1$ и 4 сентября в $21^{\text{h}}15^{\text{m}}$ с $K_p=10.0$ по КОП+БОРОК [9]

Авторы [1], указывая на неопределенность решений для гипоцентра из-за отсутствия близкой станции, использовали в своих исследованиях Кух-Зарского землетрясения решение

EMSC с координатами 35.49°N и 54.55°E (отметим, что в [5] приводится другое решение CSEM, или EMSC, указанное в табл. 1). Кроме того, землетрясение было записано семью цифровыми акселерографами в диапазоне расстояний 2–126 км от разрыва. Их записи не участвовали в обработке землетрясения, т.к. не входят в сети TЕН и THR. Один из акселерографов был расположен непосредственно в с. Кух-Зар (станция KUZ) и не пострадал в результате землетрясения. Используя разность первых вступлений S - и P -волн на записи KUZ, равную $t_S-t_P=1.64$ с, и скорости S - и P -волн, равные 3.36 и 5.80 км/с соответственно, авторы [1] получили гипоцентральное расстояние $r=13$ км и глубину $h=11$ км для эпицентра EMSC.

Решения механизма очага главного толчка, представленные на рис. 1 и в табл. 2, получены по данным Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC) и каталога тензоров сейсмического момента центроида GCMT, опубликованных в [5], а также каталога механизмов очагов землетрясений Копетдага [9]. Механизмы очагов в каталоге [9] определены совместно Институтом сейсмологии АН Туркменистана и филиалом ИФЗ РАН Геофизической обсерваторией «Борок» (далее КОП+ГО БОРОК) по знакам первых вступлений короткопериодных P -волн на сейсмических станциях Туркменистана, с привлечением данных станций мировых сетей из [5]. В отличие от применяемой в КОП+ГО БОРОК методики, в GCMT и NEIC определяется тензор сейсмического момента методом инверсии волновых форм, который считается более точным. Решение NEIC-1 получено для глубины 15 км по 14 станциям, решения NEIC-2 и NEIC-3 рассчитаны по данным 42 станций для фиксированных координат эпицентра и глубины 7 км иранского агентства TЕН. При этом механизмы очагов NEIC-1 и NEIC-2 представляют собой наилучшее решение для пары перпендикулярных друг другу нодальных плоскостей (BCD в [5], или «best double couple»), а NEIC-3 – решение, наилучшим образом соответствующее широкополосным волновым формам (BB в [5], или «fit to broadband waveforms»).

Таблица 2. Параметры механизма очага главного толчка и афтершоков Кух-Зарского землетрясения 27 августа 2010 г. с $K_p=13.8$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$

Агентство	Дата д м	t_0 ч м с	φ° , N	λ° , E	h , км	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Число зна- ков
						T		N		P		$NP1$			$NP2$			
						PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
Главный толчок																		
КОП+ГО БОРОК _p	27.08.	19 23 35	35.45	54.55	13	17	68	25	166	60	307	358	66	-62	126	35	-135	183
GCMT _{BDC}	27.08.	19 23 50	35.53	54.49	15	7	76	78	313	10	168	212	78	-2	302	88	-168	218
NEIC-1 _{BDC}	27.08.	19 23 48	35.46	54.55	15	42	108	23	222	38	332	221	87	66	126	24	174	14
NEIC-2 _{BDC}	27.08.	19 23 50	35.53	54.47	7	19	89	60	219	20	351	41	89	-29	131	61	-179	42
NEIC-3 _{BB}	27.08.	19 23 50	35.53	54.47	7	3	66	0	0	11	335	20	85	-10	111	80	-175	
Афтершоки																		
КОП+ГО БОРОК _p	28.08.	00 29 36	35.80	54.20	14	15	126	42	22	44	231	258	48	-24	5	72	-134	70
КОП+ГО БОРОК _p	04.09.	21 15 36	35.50	54.50	10	15	219	13	313	70	82	140	61	-74	291	32	-114	13

Примечание. В таблице приведены координаты эпицентра и глубины, использованные при построении механизма очага, по данным соответствующих агентств.

Решения GCMT, NEIC-2 и NEIC-3 в основных чертах совпадают: в очаге в условиях горизонтального субмеридионального сжатия и субширотного растяжения произошел левосторонний сдвиг по плоскости северо-восточного простирания, или правосторонний сдвиг по плоскости северо-западного простирания (рис. 1, табл. 2).

Механизм очага по данным КОП+ГО БОРОК [9] отличается от решений GCMT и NEIC наличием значительных сбросовых компонент по обеим нодальным плоскостям, одна из которых, юго-восточного простирания, прослеживается и во всех решениях GCMT и NEIC, но с разным наклоном, а другая, меридиональная, составляет с северо-восточными плоскостями в решениях GCMT и NEIC углы от 22° до 41° . По меридиональной плоскости в решении

КОП+ГО БОРОК преобладает сброс с компонентой левого сдвига, а по плоскости юго-восточной ориентации – правый сбросо-сдвиг. Ориентация и наклон оси растяжения по данным КОП+ГО БОРОК близки к решениям GСMT и NEIC, но ось сжатия наклонена под углом 60° к горизонту, в отличие от горизонтального сжатия в механизмах очага по данным GСMT, NEIC-2 и NEIC-3.

При выборе действующей плоскости разрыва авторы [1] опирались на результаты полевых наблюдений (вторичные трещины в эпицентральной зоне, ориентированные широтно или под углом 70° от направления на север по часовой стрелке, и северо-восточная ориентация ветвей ближайших активных разломов), а также на факт, что амплитуды скорости и смещения на записях компонент акселерографа на станции KUZ (Кух-Зар), ориентированных строго на северо-восток (45° от направления на север по часовой стрелке), превышали в 2.5–3 раза амплитуды записей перпендикулярных этому направлению компонент, и в 5 раз – амплитуды на вертикальных компонентах записи скорости и смещения. В результате механизм очага Кух-Зарского землетрясения определен как левосторонний сдвиг по разлому северо-восточного простирания. Отметим, что записи скорости и смещения получены интегрированием исходной акселерограммы, горизонтальное ускорение на которой на параллельных (Т) и перпендикулярных (L) разлому северо-восточного простирания компонентах примерно одинаково и составляет $PGA-T = 550 \text{ см/с}^2$ и $PGA-L = 501 \text{ см/с}^2$ соответственно, а вертикальное ускорение $PGA-V=369 \text{ см/с}^2$.

Принимая, что основная подвижка произошла по плоскости северо-восточного простирания, нельзя исключить возможность разрывообразования в очаге сразу в двух направлениях – северо-восточном и северо-западном. В пользу северо-западной ориентации плоскости разрыва свидетельствует присутствие нодальной плоскости подобного простирания во всех рассмотренных выше решениях механизма очага, смещение инструментальных эпицентров разных агентств на северо-запад от с. Кух-Зар, а также ориентация облака афтершоков в направлении северо-запад – юго-восток (рис. 2). К этому можно добавить высокую интенсивность сотрясений в пунктах Форат (5 баллов) и Дамган (4–5 баллов), расположенных на расстояниях 58 и 85 км соответственно, к север–северо-западу от с. Кух-Зар, при относительно слабой интенсивности проявления землетрясения на расстоянии 110 км к западу, в г. Семнан (3–4 балла).

Афтершоки. Каталог афтершоков Кух-Зарского землетрясения [12] составлен по данным Иранского сейсмологического центра, сеть ТЕН [6]. В каталоге землетрясений Копетдага [4] содержатся сведения лишь о шести из них. Учитывая невысокую точность координат эпицентров афтершоков из-за одностороннего расположения зарегистрировавших их иранских станций (для 73 % афтершоков азимутальный створ окружения станциями $<180^\circ$), в каталог афтершоков вошли все события в радиусе 25 км от эпицентра Кух-Зарского землетрясения за год после его реализации. Форшоков с начала 2010 г. не зарегистрировано.

Для афтершоков и главного толчка рассчитан энергетический класс $K_{\text{расч}}$, используя соотношение между локальной магнитудой M_n по сети ТЕН и средним по сети сейсмических станций Туркменистана энергетическим классом K_p :

$$K_p = 1.915 M_n + 2.68 \quad [11]. \quad (1)$$

Среднее отклонение расчетного класса, полученного из соотношения (1), от K_p из каталога Копетдага составило $\delta K_p = -0.1$ для семи общих событий из [4] и [6], при стандартном отклонении $\sigma K_p = 0.28$, что подтверждает применимость формулы (1). В дальнейших исследованиях афтершоковой последовательности для тех событий, для которых имелся K_p по данным КОП [4], это значение считалось окончательным, а для остальных афтершоков использовался расчетный класс.

Распределение афтершоков в пространстве и во времени показано на рис. 3.

Список афтершоков [12] включает 58 событий за 2010 г. в диапазоне энергетических классов $K_p = 7.5-12.8$ и четыре события за 2011 г. с $K_p = 7.5-9.0$ (рис. 2 в).

Как видно из рис. 3, большинство афтершоков, согласно данным ТЕН [6], располагалось на глубинах менее 10 км, и к декабрю 2010 г. афтершоковая активность практически прекратилась.

Крупнейший афтершок произошел через 5 часов после главного толчка, 28 августа в $00^{\text{h}}29^{\text{m}}$, с энергией, $E = 6.31 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$, лишь на порядок ниже энергии основного события. Его координаты по данным разных сейсмологических центров, представленные в табл. 1 и на рис. 2, отличаются гораздо большим разбросом, чем для основного толчка, с максимальными отклонениями данных MOS и КОП.

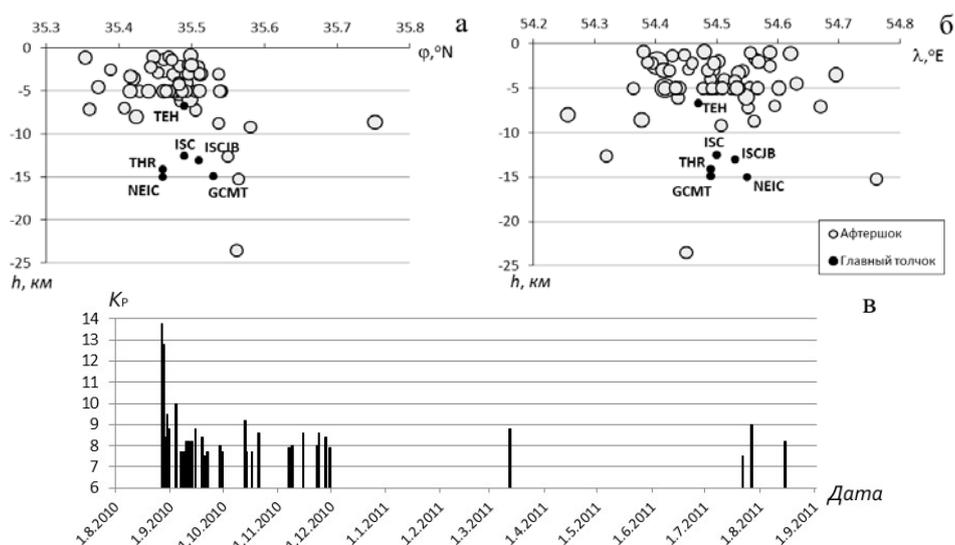


Рис. 3. Вертикальный разрез афтершоковой зоны Кух-Зарского землетрясения 27 августа 2010 г. в проекции на широту (а) и долготу (б), и распределение афтершоков во времени (в)

Механизм очага афтершока 28 августа с $K_p=12.8$ определен лишь КОП+БОРОК [9] по знакам первых вступлений P -волн на 70 станциях, включая 11 знаков сейсмических станций Туркменистана. В очаге произошел левосторонний сдвиг по широтной плоскости, или правосторонний сбросо-сдвиг – по меридиональной (рис. 2, табл. 2).

Среди других афтершоков самым крупным оказался толчок 4 сентября в 21^h15^m с $K_p=10.0$. Согласно [9], в его очаге произошел сброс по плоскости северо-западного или юго-восточного простирания. Данное решение получено с использованием всего 13 знаков вступлений P -волн и потому недостаточно надежно.

Макросейсмические данные и сильные движения грунта. По результатам полевых наблюдений [1], в области Кух-Зарского землетрясения 27 августа 2010 г. не наблюдалось существенного поверхностного разрывообразования, но имелись вторичные трещины и разрывы. В результате землетрясения в селах Кух-Зар и Тучах образовались трещины, следующие в восточном направлении. Несколько аналогичных трещин, составляющих 70° с направлением на север, было найдено в селе Келу. Помимо обрушений не армированных крыш, углов и стен домов, построенных из необожженного кирпича, или каменной кладки плохого качества, наблюдалось также частичное повреждение железобетонного здания школы в селе Кух-Зар, построенного за 4 месяца до землетрясения.

Сильные движения при Кух-Зарском землетрясении были записаны на семи станциях Научно-исследовательского центра строительства и жилищного хозяйства, который управляет иранской сетью сильных движений (табл. 3, рис. 4). Все записи с пиковыми ускорениями 0.08–0.55 g получены с помощью цифровых акселерографов Kinometrics SSA-2, в основном расположенных на севере от эпицентра землетрясения, т.к. к югу находится огромная пустыня. В табл. 3 представлены максимальные значения пиковых скоростей и ускорений на горизонтальных компонентах станций, зарегистрировавших Кух-Зарское землетрясение. Там же даны оценки инструментальной интенсивности, полученные с помощью соотношения между сейсмической интенсивностью и параметрами движения грунта, представленного в проекте российской сейсмической шкалы [13], как дающее наилучший коэффициент корреляции между содержащимися в нем параметрами:

$$I_{av}=1.325 \cdot \lg(a_{\text{пик}} \cdot v_{\text{пик}}) + 2.83, \quad (2)$$

где I_{av} – инструментальная интенсивность сотрясений в баллах; $a_{\text{пик}}$ – максимальное значение пикового ускорения на одной из горизонтальных компонент; $v_{\text{пик}}$ – максимальное значение пиковой скорости на одной из горизонтальных компонент. Тип грунтов С в табл. 3 включает некоторые четвертичные и верхние третичные пески, песчаники и аргиллиты со скоростями $750 \text{ м/с} > v_s > 350 \text{ м/с}$, а тип В – вулканиты, большинство мезозойских коренных пород и некоторые францисканские коренные породы со скоростями поперечных волн $1500 \text{ м/с} > v_s > 750 \text{ м/с}$.

Таблица 3. Максимальные значения пиковых скоростей $v_{\text{пик}}$ и ускорений $a_{\text{пик}}$ на горизонтальных компонентах акселерографов станций, зарегистрировавших Кух-Зарское землетрясение, и оценки инструментальной интенсивности

Станция	Код	Тип грунта	φ°, N	λ°, E	$a_{\text{пик}}, \text{см/с}^2$	$v_{\text{пик}}, \text{см/с}$	Инструментальная интенсивность (2)	Макросейсмическая интенсивность из [1]
Kuh-Zar	KUZ	C	35.45	54.59	550	48.27	8.7	7
Forat	FRT	C	35.92	54.31	25	2.22	5.1	5
Naimabad	NIM	C	36.25	54.62	17	1.63	4.7	–
Qooshe	QOS	B	35.96	54.03	16	1.28	4.6	–
Jam	JAM	B	35.78	53.9	14	0.53	4.0	–
Qods	GDS	B	36.36	55.44	11	0.74	4.0	–
Mojen	MJN	B	36.48	54.65	10	0.57	3.8	–

Как видно из табл. 3, интенсивность проявления Кух-Зарского землетрясения могла быть усилена на станциях Кух-Зар, Форат и Наимабад за счет более мягких грунтов, однако для пункта Форат инструментальная и макросейсмическая интенсивности совпадают. Особенно «сайт-эффект» сказался, по-видимому, на необычайно высоких амплитудах ускорения и скорости горизонтальных компонент записи акселерографа в селе Кух-Зар, в результате чего расчетная интенсивность на полтора балла превысила оцененную из полевых наблюдений. Примем для дальнейших исследований осторожную осредненную оценку интенсивности в пункте Кух-Зар 7–8 баллов. Такая же оценка интенсивности сотрясений в с. Кух-Зар следует из осредненного уравнения Шебалина [14]:

$$I=1.5 M-3.5 \lg r+3.0 \quad (3)$$

при гипоцентральной дистанции $r=13 \text{ км}$ (согласно показаниям акселерографа KUZ) и магнитуде $M_s = 5.5$ (табл. 1). В уравнении (3) подразумевается интенсивность сотрясений по шкале MSK-64 [15], которая идентична модифицированной шкале Меркалли [16,17]. Такая же интенсивность сотрясений, $I_0=7-8$ баллов, должна быть и в эпицентре при глубине гипоцентра $h_{\text{гп}}=13 \text{ км}$. Окончательно значение интенсивности в эпицентре I_0 будет уточнено после оценки глубины гипоцентра и макросейсмической магнитуды, соответствующих наилучшим образом всем имеющимся макросейсмическим данным.

Сведения о макросейсмических проявлениях Кух-Зарского землетрясения в населенных пунктах, представленные в табл. 4, собраны из статьи [1] и с сайта Геологической службы США, раздел DYFI (Did You Feel It?) [2]. В ближней к эпицентру Кух-Зарского землетрясения зоне, на расстояниях менее 110 км, было обследовано 53 населенных пункта [1], однако только 20 пунктов упоминаются в тексте статьи, а для пунктов с указанными интенсивностями не приводятся координаты. Для их уточнения были использованы карты Google и другие источники в Интернете. В табл. 4 включены также инструментальные интенсивности в пунктах Наимабад, Куше, Джам, Кодс и Моджен из табл. 3, для которых не удалось найти данных о макросейсмической интенсивности. Для Тегерана, основываясь на указанной в [1] интенсивности $I=2$ балла, а в [2] – $I=3$ балла, взята средняя оценка $I=2-3$ балла.

Из Туркменистана сведений о проявлениях Кух-Зарского землетрясения не поступало.

Таблица 4. Макросейсмические данные о Кух-Зарском землетрясении 27 августа 2010 г. (расстояния даны от инструментального эпицентра ($\varphi=35.45 \text{ N}$, $\lambda=54.566^\circ \text{ E}$))

№	Пункт	φ°, E	λ°, N	$\Delta, \text{км}$	Источник	№	Пункт	φ°, E	λ°, N	$\Delta, \text{км}$	Источник
	<u>7–8 баллов</u>						<u>6 баллов</u>				
1	Кух-Зар	35.447	54.590	2	[1]	6	Мехдибад	35.308	54.693	21	[1]
	<u>7 баллов</u>					7	Хусейния	35.248	54.538	24	[1]
2	Тучах	35.428	54.568	2	[1]	8	Сатвех	35.272	54.690	24	[1]
3	Салмабад	35.435	54.579	2	[1]	9	Бидестан	35.284	54.730	26	[1]
4	Келу	35.457	54.602	3	[1]	10	Моаллеман	35.221	54.564	27	[1]
5	Шими	35.461	54.605	4	[1]	11	Решм	35.202	54.430	31	[1]
						12	Торуд	35.428	55.015	42	[1]

№	Пункт	φ°, E	λ°, N	Δ , км	Источ-ник	№	Пункт	φ°, E	λ°, N	Δ , км	Источ-ник
	<u>5 баллов</u>						<u>3 балла</u>				
13	Форат	35.920	54.310	56	[1]	22	Ашраф	36.720	53.550	166	[2]
	<u>4-5 баллов</u>					23	Сари	36.567	53.060	182	[2]
14	Куше	35.96	54.03	74	[1]	24	Карчак	35.420	51.580	269	[2]
15	Дамган	36.170	54.350	81	[1]	25	Исламшехр	35.540	51.200	303	[2]
16	Наймабад	36.25	54.62	89	[1]	26	Кодс**	35.730	51.180	306	[2]
	<u>4 балла</u>					27	Шахрна райяр	35.658	51.058	317	[2]
17	Джам	35.78	53.9	70	[1]	28	Кередж	35.816	50.970	326	[2]
18	Имамшехр	36.420	54.970	113	[2]	29	Месджеде-Солейман	31.980	49.300	621	[2]
19	Моджен	36.48	54.65	115	[1]	30	Ардебиль	38.250	48.300	637	[2]
20	Кодс*	36.36	55.44	128	[1]		<u>2-3 балла</u>				
	<u>3-4 балла</u>					31	Тегеран	35.670	51.430	283	[2]
21	Семнан	35.550	53.370	107	[1]		<u>2 балла</u>				
						32	Эль Амара	31.850	47.170	792	[2]

Примечание. Кодс* – провинция Семнан, Кодс** – провинция Тегеран.

Карта изосейст Кух-Зарского землетрясения представлена на рис. 4. Изосейсты 4-го, 5-го, 6-го и 7-го баллов взяты из [1] и достроены для определения площади изосейст, изосейста с $I=3$ б. построена автором статьи на основе дополнительных данных из [2]. Из карты изосейст можно визуально определить более сильное затухание интенсивности сотрясений между 4- и 5-балльной изосейстами и более слабое – между 3- и 4-балльной изосейстами.

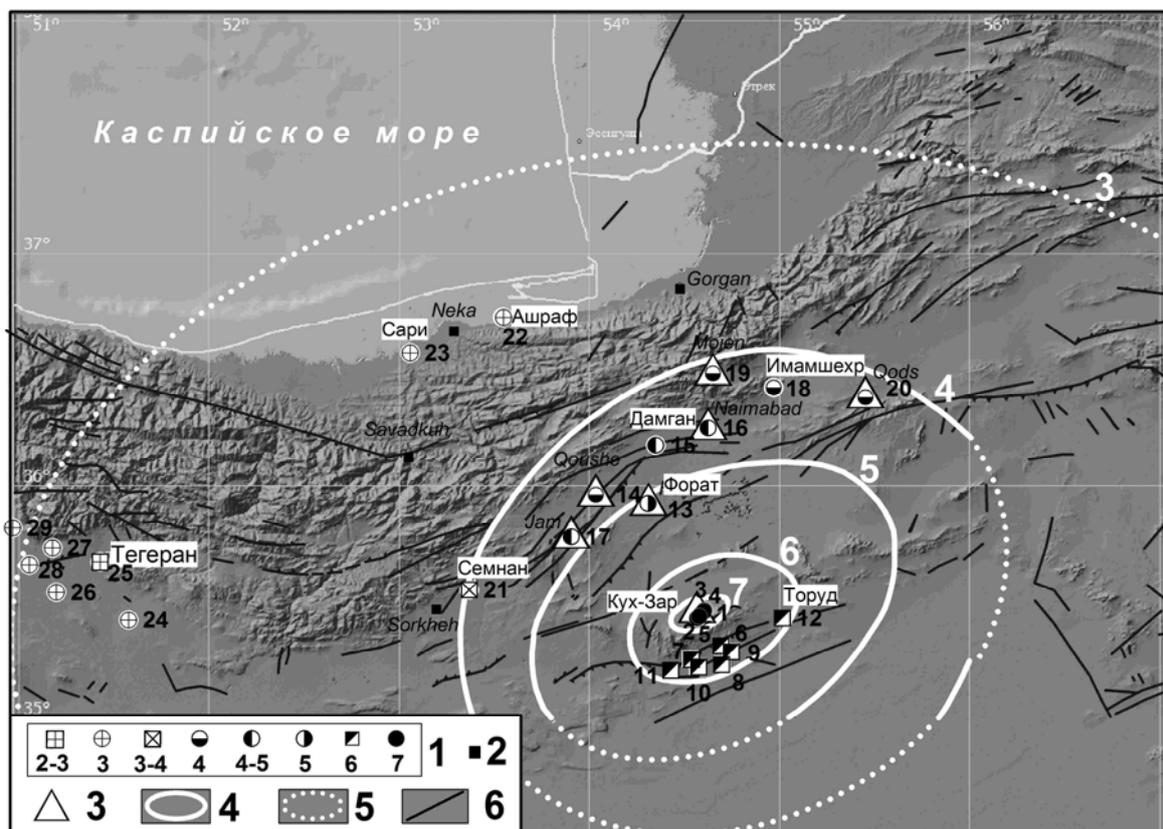


Рис. 4. Карта изосейст Кух-Зарского землетрясения 27 августа 2010 г. в 19^h23^m с $K_p=13.8$

1 – интенсивность по модифицированной шкале Меркалли в баллах; 2 – пункты, где макросейсмическое обследование проводилось, но данные в [1] не приведены; 3 – станция сильных движений; 4 – изосейста из [1]; 5 – достроенные автором изосейсты; 6 – разлом по Берберяну [10].

Для изосейст на рис. 4 независимым от предположений о магнитуде способом рассчитаны коэффициенты затухания ν и макросейсмические глубины h_1 в первом приближении, используя формулы:

$$\lg \overline{\Delta_{i+1}} / \overline{\Delta_i} = 1 / \nu, \quad (4)$$

$$h_1 = \overline{\Delta_i} / \sqrt{10^{2(I_0 - I_i) / \nu} - 1}, \quad (5)$$

$$\overline{\Delta_i} = \sqrt{S_i / \pi}, \quad (6)$$

где S_i , $\overline{\Delta_i}$ и I_i – площадь, средний радиус и интенсивность i -й изосейсты соответственно, $I_0=7.5$ – интенсивность в эпицентре.

Использование формул (4) и (5) возможно только для эпицентральных расстояний, более чем в три раза превышающих средний радиус изосейсты (обычно это изосейсты с $i \geq 3$), на которых можно пренебречь разницей между гипо- и эпицентральными расстояниями.

2-е приближение ν и h_1 , позволяющее привлечь к анализу не только дальние, но и более надежные первые изосейсты, находилось с помощью формул (4) и (5), в которые вместо $\overline{\Delta_i}$ подставлялись гипоцентральные расстояния $\overline{r_i} = \sqrt{\overline{\Delta_i}^2 + \overline{h_1}^2}$. Здесь $\overline{h_1}$ – среднее значение глубин, рассчитанных в первом приближении для каждой изосейсты.

Параметры изосейст Кух-Зарского землетрясения и рассчитанные с их помощью коэффициенты затухания и макросейсмические глубины представлены в табл. 5.

Таблица 5. Площади, средние радиусы изосейст и вычисленные по ним коэффициент затухания ν и макросейсмическая глубина h_1 Кух-Зарского землетрясения

I_i , баллы	7	6	5	4	3	3–7
S_i , км ²	322	3730	17796	46699	228764	
$\square \overline{\Delta_i}$, км	10	35	75	122	270	
$\nu_{i, i+1}$	2.83		4.86			$\square \overline{\nu} = 3.44$
		3.15		2.91		
h_{1i} , км	11.6	13.3	14.0	11.6	12.8	$\square h_1 = \overline{h_{1i}} = 12.7$

Как видно из табл. 5, коэффициенты затухания сильно варьируют для разных пар изосейст, вероятно, вследствие недостатка макросейсмических данных и некоторого произвола оконтуривания 7-балльной, северной части 6-балльной изосейсты и южной части остальных изосейст. Но среднее значение $\overline{\nu} = 3.44$ близко к $\nu = 3.5$ в осредненном уравнении Шебалина (3).

Для уточнения коэффициента затухания и макросейсмических параметров землетрясения (I_0 , M_1 , h_{1M}) другим способом, не зависящим от произвола при проведении отдельных изосейст, построен график связи интенсивностей сотрясений в населенных пунктах с гипоцентральной расстоянием r (рис. 5). Для расчета r использованы эпицентральные расстояния из табл. 4 и глубина $h=13$ км.

Уравнение регрессии, установленное для всех наблюдаемых данных в предположении $h=13$ км, имеет вид:

$$I = 10.09 - 2.9 \lg r, \quad R = -0.97. \quad (7)$$

Низкий коэффициент затухания в (7), $\nu=2.9$, объясняется пониженной по сравнению с ожидаемой при изотропном затухании интенсивностью сотрясений в большинстве населенных пунктов, расположенных на малых эпицентральных расстояниях ($\Delta < 200$ км) поперек ориентации основных тектонических структур, и повышенной интенсивностью в дальних населенных пунктах, выстроившихся вдоль большой оси эллипсоида затухания. Кроме того, в пунктах Месджеде-Солейман ($\Delta=621$ км) и Ардебиль ($\Delta=637$ км), возможно, завышена интенсивность сотрясений. Исключив три самых дальних пункта из анализа, получаем:

$$I = 10.58 - 3.2 \lg r, \quad R = -0.98. \quad (8)$$

В целом данные на графике (рис. 5) неплохо соответствуют уравнению Шебалина (3) при

магнитуде $MLH=5.6$, кроме трех последних точек. Поскольку магнитуда в уравнениях типа (3) в [14] является магнитудой MLH , значение $MLH=5.6$ получено из магнитуд M_s (ISC) и M_S (MOS) из табл. 1 с помощью соотношений для Кавказ-Копетдагского региона [18]:

$$MLH=0.89 M_s+0.73, \quad (9)$$

$$MLH=0.88 M_S+0.83. \quad (10)$$

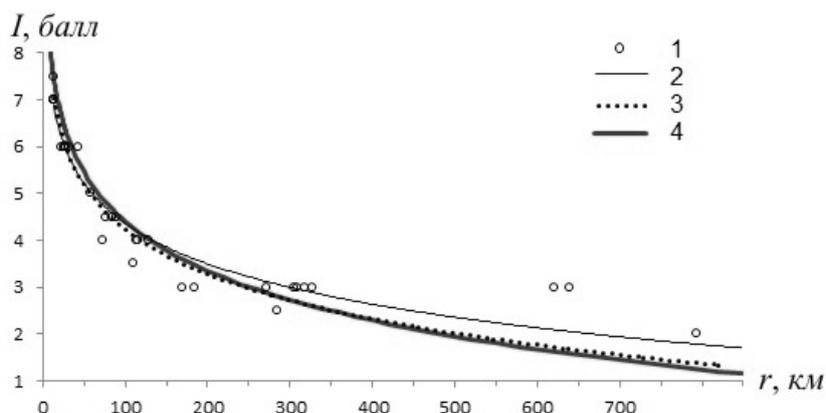


Рис. 5. График зависимости интенсивности I проявления Кух-Зарского землетрясения в населенных пунктах от гипоцентрального расстояния r при $h=13$ км

1 – наблюдаемые данные $I(r)$; 2 – установленная для всех пунктов зависимость (7); 3 – установленная для пунктов на расстояниях менее 400 км зависимость (8); 4 – кривая затухания интенсивности согласно уравнению макросейсмического поля (3) при $M=MLH=5.6$.

Из уравнений (7) и (8) интенсивность в эпицентре составляет $I_0=7$ баллов, а из (3) при $M=5.6 - I_0=7-8$ баллов.

Макросейсмическая глубина, согласно уравнению Шебалина (3) при $M=5.6$ и $I_0=7-8$ баллов, равна $h_{IM}=13$ км. Если же принять интенсивность в эпицентре $I_0=7$ баллов, то глубина Кух-Зарского землетрясения должна составлять $h_{IM}=18$ км, что противоречит гипоцентральному расстоянию $r=13$ км согласно показаниям акселерографа КУЗ в селе Кух-Зар ($t_s-t_p=1.64$ с).

Таким образом, наблюдаемым макросейсмическим данным по Кух-Зарскому землетрясению наилучшим образом соответствует значение интенсивности в эпицентре $I_0=7-8$ баллов и макросейсмические глубины $h_{IM}=h_1=13$ км.

Л и т е р а т у р а

1. Shahvar, M. and Zaré, M., 2013. The 27 August 2010 M_w 5.7 Kuh-Zar earthquake (Iran): field investigation and strong-motion evidence, *Natural Hazards*, 66, 2, 689-706, DOI: 10.1007/s11069-012-0507-8.
2. United States Geological Survey (USGS). Latest Earthquakes. M5.8 – northern Iran. – URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000hjuq#dyfi>.
3. Wikipedia, The Free Encyclopedia. – URL: <https://en.wikipedia.org/>.
4. Сарыева Г.Ч. (отв. сост.), Тачов Б., Халлаева А.Т., Клочков А.В., Дурасова И.А., Эсенова А., Петрова Н.В., Мустафаев Н.С., Артёмова Е.В. (сост.). Каталог землетрясений Копетдага за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
5. International Seismological Centre, On-line Bulletin, Internat. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
6. Iranian Seismological Centre. Online Databank – URL: <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>
7. Рахимов А.Р., Славина Л.Б. Региональный годограф Копетдагской сейсмической зоны // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. – 1984. – № 3. – С. 31–38.
8. Розова Е.А. Составление годографа и определение основных сейсмических элементов для Средней Азии // Труды Сейсмологического института АН СССР. – М.: АН СССР, 1936. – С. 72–28.

9. **Петров В.А., Безменова Л.В. (отв. сост.), Петрова Н.В. (сост.)**. Каталог механизмов очагов землетрясений Копетдага за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
10. **Berberian M.** Historical Seismicity (pre 1900) Map of Iran. Scale 1:5000000 // Geological Survey of Iran, Tectonic-Seismotectonic Research Section. – 1977.
11. **Петрова Н.В., Безменова Л.В., Сарыева Г.Ч., Чарыев М.М.** Копетдаг // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 112–127.
12. **Петрова Н.В. (отв. сост.)**. Афтершоки Кух-Зарского землетрясения 27 августа 2010 г. с $K_p=13.8$, $M_w=5.8$. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
13. **Проект новой российской сейсмической шкалы** // Инженерные изыскания. – 2011. – № 10. – С. 62–71.
14. **Шебалин Н.В.** Коэффициенты уравнения макросейсмического поля по регионам // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 30.
16. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага)**. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
16. **Гир Дж., Шах Х.** Модифицированная шкала Меркалли // Зыбкая твердь. – М.: Мир, 1988. – С. 105–108.
17. **Современный вид шкал MSK-64 и Меркалли.** (См. Приложение к наст. сб. на CD).
18. **Петрова Н.В., Михайлова Р.С.** Проблемы единой магнитудной классификации землетрясений Кавказ-Копетдагской сейсмоактивной зоны // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы, Азербайджан. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 257–262.