

СИЛЬНЫЕ и ОЩУТИМЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**ТУРКМЕНО-ХОРАСАНСКИХ ГОР в 2017 г.****Н.В. Петрова¹, Г.Ч. Сарыева², Л.В. Безменова², А.Д. Курова¹**¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, npetrova@gsras.ru²Институт сейсмологии и физики атмосферы АН Туркменистана, г. Ашхабад, tm.seismology@online.tm

Аннотация. В 2017 г. в центральном и юго-восточном Копетдаге произошли крупнейшие за два последних десятилетия землетрясения – 5 апреля с $K_p=14.3$, $M_{WGCMT}=6.0$ и 13 мая с $K_p=13.4$, $M_{WGCMT}=5.7$. Землетрясение 5 апреля явилось к тому же самым сильным в зоне радиусом 45 км от его эпицентра за всю сейсмическую историю региона. Оба события ощущались в населенных пунктах Ирана, Туркменистана, Афганистана и других стран. Максимальные сотрясения зафиксированы в ближайших населенных пунктах Ирана – 6 баллов в г. Торбете-Джам при землетрясении 5 апреля и 7 баллов в г. Боджнурд при событии 13 мая. Для землетрясения 5 апреля, локализованного в зоне контакта юго-восточного окончания Копетдага с Биналудом, построена карта изосейст, на основе которой определена северо-западная ориентация изосейст, совпадающая с простираем ближайших разломов, облака афтершоков и одной из нодальных плоскостей механизма очага. При этом обнаружено юго-западное падение облака афтершоков, не соответствующее северо-восточному падению выбранной в качестве действующей нодальной плоскости. Данное несоответствие свидетельствует, по-видимому, о сложной структуре разломной зоны с участками разнонаправленного падения, либо с двумя параллельными разломами, плоскости которых падают на северо-восток и юго-запад. Получено уравнение макросейсмического поля, согласно которому интенсивность сотрясений в эпицентре землетрясения 5 апреля оценена в $I_0=8$ баллов. Для землетрясения 13 мая 2017 г. в центральном Копетдаге, предвзявшего трехмесячным сейсмическим затишьем, определены границы зоны затишья, исследованы пространственно-временные особенности афтершокового процесса, установлена модель распространения сейсмического эффекта, на основе которой получена интенсивность в эпицентре – $I_0=7-8$ баллов. Эта оценка подтверждается 7-балльной интенсивностью сотрясений в Боджнурде ($\Delta=24$ км).

Ключевые слова: энергетический класс, магнитуда, сейсмическая активность, сейсмическое затишье, форшок, афтершок, механизм очага, интенсивность сотрясений.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.29 **EDN:** JPXWLN

Для цитирования: Петрова Н.В., Сарыева Г.Ч., Безменова Л.В., Курова А.Д. Сильные и ощутимые землетрясения Туркмено-Хорасанских гор в 2017 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 315–326. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.29. EDN: JPXWLN

Введение. В 2017 г. значительно возросла сейсмическая активность на территории Туркмено-Хорасанских гор в Копетдагском регионе. Туркмено-Хорасанские горы – крупная горная система на северо-востоке Ирана и юге Туркменистана, на северной окраине Альпийской складчатой области, включающая дугообразные глыбово-складчатые структуры, в составе которых с юга на север выделяются: мегантиклинорий Аладага–Биналуда, Кучано–Мешхедский плиоцено-антропогеновый наложенный прогиб и мегантиклинорий Копетдага. Здесь, в Центральном и Восточном Копетдаге, в 2017 г. произошли два крупнейших за последние десятилетия землетрясения: 5 апреля с $K_p=14.3$, $M_{WGCMT}=6.0$ и 13 мая с $K_p=13.4$, $M_{WGCMT}=5.7$ (рис. 1).

Землетрясение 5 апреля, в зарубежных публикациях чаще всего упоминаемое как «Сефид-Сангское», реализовалось северо-восточнее иранского селения Сефид-Санг в зоне контакта горных структур юго-восточного окончания Копетдага с Биналудом, где сейсмические события подобной магнитуды неизвестны. Ближайшие сопоставимые или большие по величине землетрясения датированы 1904 г. ($M_s=6.6$, $\Delta=46$ км к западу от эпицентра) и 765 г. ($M_s=7.5$, $\Delta=73$ км к югу). Несмотря на малонаселенность района очага, землетрясение вызвало массовые разрушения в четырех ближайших селениях Ирана, в результате которых два человека погибли и еще 100 получили ранения [1]. На иранской территории землетрясение 5 апреля 2017 г. проявилось с максимальной интенсивностью 6 баллов в г. Торбете-Джам (77 км), 5 баллов – в трех населенных пунктах [2]. В Туркменистане ощущались 3-балльные сотрясения в п. Серахс (101 км) и г. Серхетабаде (190 км) [3].

Землетрясение 13 мая 2017 г. произошло в Центральном Копетдаге вблизи его условной границы с Западным Копетдагом, проходящей по долготе г. Арчман (57.2°E), в 24 км к северу от иранского г. Боджнурда и в 10 км к западу от очага катастрофического Боджнурдского землетрясения 04.02.1997 г. с $M_s=6.6$ [4]. Оно стало крупнейшим за 20-летний период (1998–2017 гг.) в очаговой зоне Боджнурдского землетрясения 1997 г. радиусом 35 км. По сообщению РИА Новости, «...По меньшей мере три человека погибли и еще 225 были ранены». В Боджнурде землетрясение ощущалось с интенсивностью 7 баллов, в других городах Ирана и Афганистана – от 4 до 2 баллов [2]. На территории Туркменистана жители почувствовали 4-балльные сотрясения в г. Ашхабаде ($\Delta=98$ км) и пос. Энев ($\Delta=108$ км) [2, 3].

Землетрясения 5 апреля и 13 мая 2017 г. были записаны сейсмическими сетями многих стран мира и обработаны рядом национальных и международных сейсмологических центров, но самые близкие станции расположены в Иране и Туркменистане, причем в Иране для фиксации афтершоков сразу после события 5 апреля была организована локальная сейсмическая сеть, включающая 16 велосиметров и три акселерометра [1]. В текущей статье мы рассматриваем инструментальные сведения об этих землетрясениях и их афтершоках по данным единой сети сейсмических станций Института сейсмологии и физики атмосферы Академии наук Туркменистана (далее – «ИСИФА АНТ») с привлечением данных мировых агентств и опубликованных статей, а также особенности макросейсмических проявлений этих землетрясений.

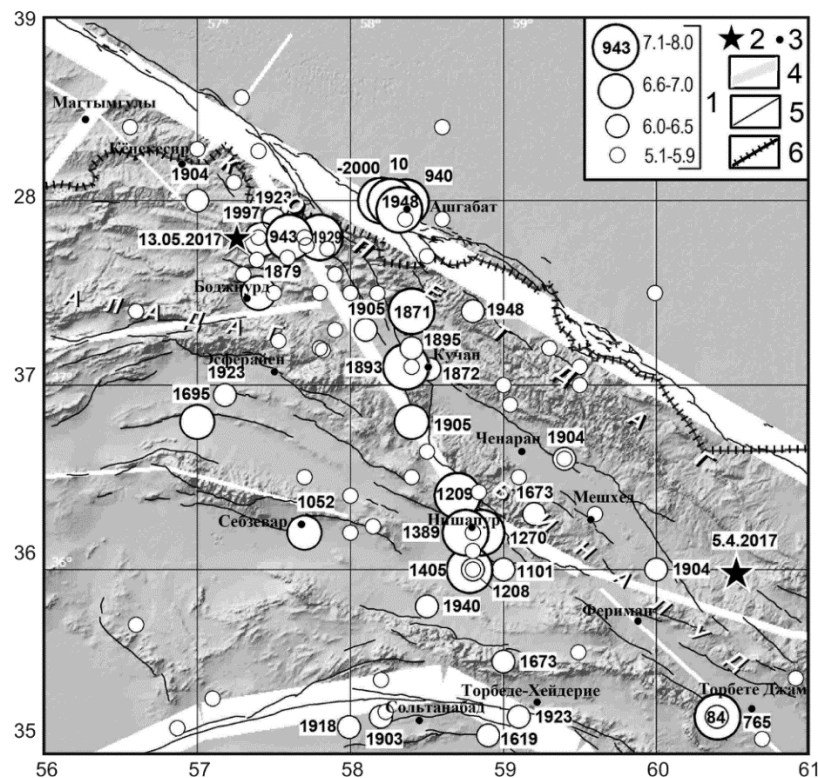


Рис. 1. Историческая сейсмичность Туркмено-Хорасанских гор с 2000 г. до н.э. по 2017 г.

1 – магнитуда $M=MLH=M_s$; 2 – эпицентры максимальных землетрясений 2017 г.: 5 апреля с $K_p=14.3$ и 13 мая с $K_p=13.4$; 3 – город; 4 – сейсмолинеамент; 5 – активный разлом согласно [5]; 6 – государственная граница.

Землетрясение 5 апреля 2017 г. в $06^{\text{h}}09^{\text{m}}$ с $K_p=14.3$, $M_w=6.0$.

Инструментальные данные. Сейсмическая сеть Туркменистана включала в 2017 г. 34 цифровые станции [3], большинство из которых зарегистрировало это выдающееся сейсмическое событие. Обработка записей для определения основных параметров землетрясения произведена по 21 наиболее надежным станциям. В результате ошибка определения эпицентра главного толчка составила $\delta r=\pm 7$ км, а ошибка глубины – $\delta h=\pm 1$ км. Основные параметры главного толчка и максимального афтершока, согласно каталогу КОП [6] и по данным международных сейсмологических центров, опубликованным в [7], приведены в табл. 1, а решения для эпицентров показаны на рис. 2.

Таблица 1. Основные параметры землетрясения 5 апреля 2017 г. с $K_p=14.3$ и его максимального афтершока 2 мая с $K_p=12.6$ по данным различных сейсмологических центров

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр			δr , км	Магнитуда	Источник
			φ° , N	λ° , E	h , км			
Главный толчок 5 апреля 2017 г.								
КОП	06:09:10	1.15	35.90	60.36	12	7.0	$K_p=14.3/21$	[6]
ISC	06:09:11.91	–	35.813	60.431	12.2	–	$M_s=6.0/346$, $m_b=5.8/519$	[7]
ISC-EHB	06:09:11.54	–	35.732	60.377	11.2	0.9	$M_s=6.0/346$, $m_b=5.8/519$	[7]
TEH	06:09:08.50	–	35.847	60.339	6.0	54.0	$M_L=6.0$	[7]
THR	06:09:10.60	0.55	35.785	60.361	14.1	8.8	$M_L=6.0$	[7]
MOS	06:09:11.91	–	35.976	60.524	12.2	–	$M_s=5.8/61$, $m_b=5.9/85$	[7]
IDC	06:09:09.99	0.29	35.7289	60.3912	0.0f	–	$M_s=5.8/84$, $m_b=5.5/58$, $M_L=4.6/5$	[7]
NEIC	06:09:11.91	–	35.8130	60.4308	12.2	–	$m_b=5.8/412$	[7]
GCMT	06:09:11.91	–	35.81	60.37	12.2	–	$M_w=6.0/162$	[7]
BJI	06:09:08.80	–	35.8300	60.4100	5.0	–	$M_s=6.4/98$, $m_b=5.5/84$, $m_B=6.0/77$	[7]
Максимальный афтершок 2 мая 2017 г.								
КОП	21:12:10	1.07	35.80	60.45	10	32.0	$K_p=12.6/22$	[6]
ISC	21:12:10.71	0.38	35.7771	60.603	9.0	2.2	$m_b=5.0/204$, $M_s=4.6/125$	[7]
TEH	21:12:07.00	–	35.7480	60.483	6.0	53.0	$M_L=5.3$	[7]
THR	21:12:10.70	0.86	35.7050	60.432	15.0	–	$M_L=5.3$	[7]
MOS	21:12:12.80	1.68	35.8880	60.736	33.0f	–	$m_b=5.2/53$, $M_s=4.4/18$	[7]
IDC	21:12:08.79	0.49	35.6473	60.5351	0.0f	–	$m_b=4.6/30$, $M_s=4.5/81$, $M_L=4.5/7$	[7]
NEIC	21:12:11.09	1.22	35.8339	60.5704	10.0f	–	$m_b=5.1/147$	[7]
GCMT	21:12:10.10	0.10	35.6600	60.5800	12.0f	–	$M_w=5.1/118$	[7]
BJI	21:12:11.70		35.8200	60.9200	7.0	–	$M_s=5.2/72$, $m_b=4.7/70$, $m_B=5.0/62$	[7]

Примечание. Δt_0 – ошибка определения времени в очаге; δr – большая полуось 90 % эллипса ошибок в км; f – фиксированная глубина. Через косую черту обозначено количество используемых станций.

КОП – ИСиФА АНТ; ISC – International Seismological Center, UK (<https://doi.org/10.31905/D808B830>); ISC-EHB – переработанная версия бюллетеня ISC; TEH – Iranian Seismological Centre, Institute of Geophysics, University of Tehran (<http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>); THR – International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (<http://www.iiees.ac.ir/>); MOS – ФИЦ ЕГС РАН, Обнинск, Россия (<http://www.gsras.ru>); NEIC – National Earthquake Information Center, USA (<https://earthquake.usgs.gov>); GCMT – The Global CMT Project, Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, USA (<https://www.globalcmt.org>); IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBTO), Austria (<https://www.ctbto.org>); BJI – China Earthquake Networks Center (<http://www.cea.gov.cn>).

Как видно из табл. 1 и рис. 2, решения разных агентств для эпицентра главного толчка расположены компактной группой, за исключением MOS. При этом отклонения координат эпицентра по данным КОП от таковых по данным других агентств не превышают $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda=\pm 0.17^\circ$. Глубина варьирует еще меньше – $h=5-14$ км для разных агентств. Глубина $h=12$ км по данным КОП совпадает с h_p по данным ISC [7], что делает ее наиболее надежной. Разброс решений для координат эпицентра максимального афтершока 2 мая значительно выше, тогда как глубина остается примерно в тех же пределах, что и для главного толчка – $h=6-15$ км. Фиксированная глубина в расчет не принималась. Обращает на себя внимание смещение эпицентра максимального афтершока на юго-восток по данным всех агентств, за исключением NEIC.

Решения для механизмов очагов землетрясения 5 апреля и его афтершоков, параметры которых представлены в [8] и табл. 2, получены сотрудниками ИСиФА АНТ и филиала Института физики Земли РАН Геофизической обсерватории «Борок» (КОП+ГО БОРОК в табл. 2) по знакам первых вступлений P -волн на сейсмических станциях Туркменистана, Ирана [9] и международных сетей [7]. По данным большинства агентств, подвижка в очаге главного толчка содержала преобладающую взбросовую компоненту по плоскости северо-западного простирания, падающей на северо-восток, или близширотного простирания с падением на юг (табл. 2, рис. 3). Ориентация облака афтершоков (рис. 3), механизм очага максимального афтершока и смещение его эпицентра на юго-восток свидетельствуют в пользу северо-западной плоскости.

Афтершоки. В течение 2017 г. сейсмической сетью Туркменистана зарегистрировано 470 афтершоков с $K_p=4.0-12.6$ в радиусе 30 км от эпицентра главного толчка, из них 405 – с $K_p\geq 7.6$. Для афтершоков ошибка определения координат эпицентра в 59 % случаев не превышала $\delta r=10$ км (рис. 4 а), а ошибка определения глубины всех событий – не более $\delta h=7$ км. Максимумы числа афтершоков приходятся на интервалы глубин 0–5 и 11–15 км (рис. 4 б).

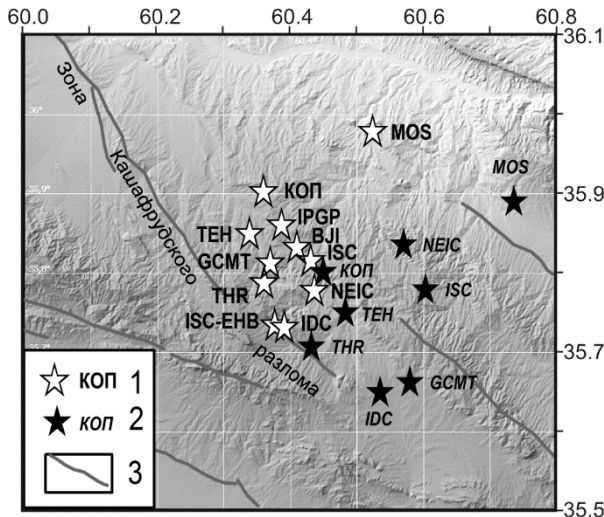


Рис. 2. Положение эпицентра главного толчка 5 апреля 2017 г. и его максимального афтершока 2 мая по данным сети станций Туркменистана (КОП)

и международных сейсмологических центров

1 – эпицентр главного толчка, название агентства указано рядом со значком; 2 – то же для эпицентра максимального афтершока; 3 – активный разлом согласно [5].

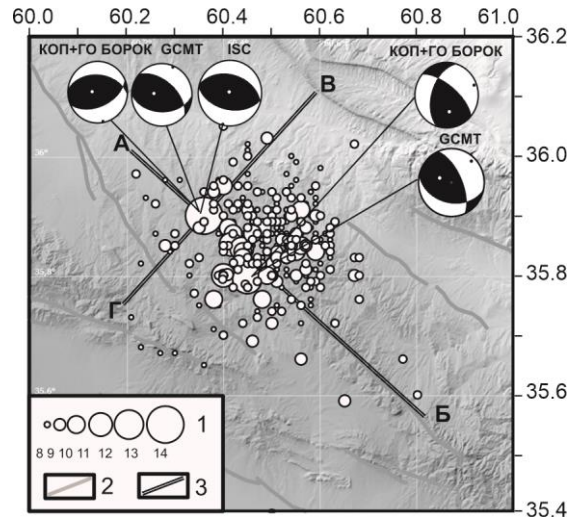


Рис. 3. Афтершоки землетрясения 5 апреля 2017 г. и механизмы очагов главного толчка и максимального афтершока 2 мая по данным разных агентств

1 – энергетический класс K_p ; 2 – активный разлом [5]; 3 – линии вертикальных разрезов вдоль (АБ) и поперек (ВГ) облака афтершоков, представленных на рис. 4.

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясения 5 апреля 2017 г. с $K_p=14.3$ и его максимального афтершока 2 мая с $K_p=12.6$ по данным различных сейсмологических центров

№ п/п	Дата д.м.г.	t_0 ч мин с	M_w	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						Агентство
				T		P		$NP1$			$NP2$			
				PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
Главный толчок 5 апреля														
1	5.04.2017	06 09 10	–	75	274	4	169	66	51	71	274	43	112	КОП+ГО БОРОК [8] GCMT [7] NEIC [7] NEIC [7] ISC [7]
			6.0	68	281	5	23	91	44	59	312	53	117	
			–	66	299	2	205	93	51	59	317	48	123	
			–	61	360	27	203	105	73	80	316	20	120	
			–	86	328	3	193	101	48	87	286	43	94	
Максимальный афтершок 2 мая														
2	2.05.2017	21 12 10	5.1	48	171	9	71	198	51	148	310	66	44	КОП+ГО БОРОК [8] GCMT [7]
			–	59	291	14	44	102	39	43	336	64	121	

Согласно рис. 3, облако афтершоков, особенно сильных, ориентировано в направлении СЗ–ЮВ, аналогично простиранию плоскости $NP2$ в решениях механизма очага для главного толчка и максимального афтершока (табл. 2). Вертикальные разрезы вдоль и поперек облака (линии АБ и ВГ на рис. 3) обнаруживают общее падение облака афтершоков на юго-запад (рис. 4 в, г). Однако от гипоцентра главного толчка прослеживается и восходящая цепочка крупных афтершоков в юго-западном направлении, указывающая на возможное северо-восточное падение плоскости разрыва.

Временные зависимости числа и выделенной энергии афтершоков с $K_p \geq 7.6$ в радиусе 30 км от главного толчка, суммированных в 5-суточных интервалах, представлены на рис. 4 д. На рис. 4 е показана установленная методом наименьших квадратов билогарифмическая зависимость числа афтершоков с $K_p \geq 7.6$ от времени с довольно высоким коэффициентом корреляции $R=0.89$:

$$\lg N = -1.176 \cdot \lg t + 2.68. \quad (1)$$

Параметр p степени затухания афтершоков в уравнении (1), $|p|=1.176$, несколько выше среднемирового $|p|=1$, что свидетельствует о более быстром затухании афтершокового процесса. Согласно уравнению (1), суточное число афтершоков с $K_p \geq 7.6$ упало с $N=32$ в течение десятых суток после главного толчка до $N=2$ за сотые сутки.

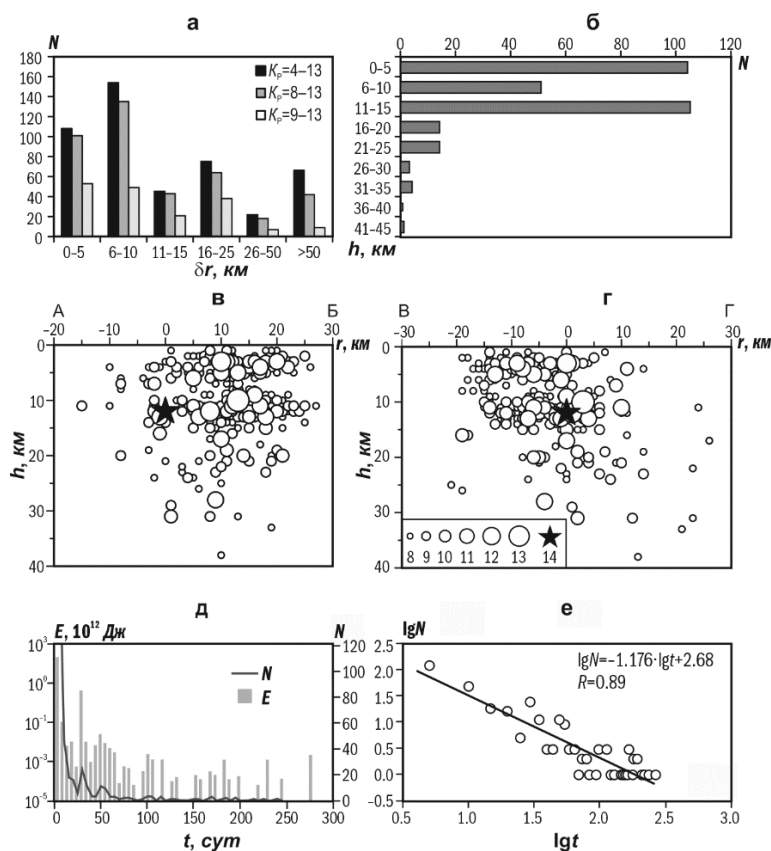


Рис. 4. Анализ афтершоковой последовательности землетрясения 5 апреля:
 а) количественное распределение ошибок δr определения координат афтершоков в разных диапазонах энергетических классов;
 б) распределение числа афтершоков по интервалам глубин;
 в, г) вертикальные разрезы облака афтершоков в проекции на линию АБ (вдоль облака) и ВГ (поперек); положение линий АБ и ВГ показано на рис. 3;
 д) распределение по 5-суточным интервалам числа и выделенной энергии афтершоков с $K_p \geq 7.6$ в радиусе 30 км от главного толчка;
 е) билогарифмическая зависимость числа афтершоков с $K_p \geq 7.6$ от времени в сутках

Макросейсмические проявления. В Туркменистане специальные исследования проявлений землетрясения 5 апреля не проводились, а сведения об его ощутимости получены по сообщениям заведующих сейсмическими станциями. С интенсивностью 3 балла землетрясение ощущалось в пос. Серахс (101 км) и г. Серхетабаде (190 км), 2–3 балла – в г. Ашхабаде (289 км). Эти данные дополнены опубликованными на сайте Геологической службы США (USGS) [2] в разделе DYFI результатами Интернет-опроса, согласно которым с максимальной интенсивностью 6 баллов землетрясение проявилось в г. Торбете-Джам (77 км), а жители 14 населенных пунктов ощущали сотрясения от 2 до 5 баллов в зависимости от удаленности. Ощущалось землетрясение и в других странах – Афганистане (Герат), Армении (Мегри), ОАЭ (Аш-Шарика). Сведения с сайта USGS [2], где баллы указаны по шкале MMI, и сообщения из Туркменистана с баллами по шкале MSK-64 суммированы в табл. 3. Эти шкалы в основном идентичны. Отметим, что отзывы об интенсивности сотрясений для каждого населенного пункта, представленного на сайте DYFI USGS, сгруппированы в «сообщества» по почтовым индексам или ближайшим городам, т.е. каждая оценка для пункта является не индивидуальным наблюдением, а мерой последствий землетрясения в определенной области, так называемой «Community Decimal Intensity» (CDI). Так как для разных пунктов CDI получены по разному количеству отзывов ($N_{отз}$ в табл. 3), надежность этих оценок различна.

Таблица 3. Макросейсмические данные о землетрясении 5 апреля 2017 г. с $K_T=14.3$

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	$N_{отз}$	№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	$N_{отз}$
6 баллов						10	Нишапур	145	36.23	58.79	8
1	Торбете-Джам	77	35.22	60.62	5	11	Серхетабад*	190	35.27	62.31	1
5 баллов						12	Ашгабат	289	37.96	58.37	6
2	Мешхед	82	36.27	59.57	192	13	Тегеран	806	35.67	51.43	6
3	Серахс (Иран)	101	36.54	61.16	1	14	Абаде	885	31.18	52.67	2
4	Ченаран	138	36.64	59.12	3	2 балла					
4 балла						15	Торбеде-Хейдерие	124	35.28	59.22	1
5	Фариман	48	35.72	59.88	5	16	Дерегез	205	37.45	59.11	1
6	Кучан	212	37.1	58.51	3	17	Гонабад	230	34.35	58.68	1
7	Герат	241	34.35	62.22	7	18	Себзевар	244	36.24	57.68	1
8	Энев	276	37.89	58.51	1	19	Мегри	1290	38.9	46.24	1
3 балла						1 балл					
9	Серахс (Туркм.)*	104	36.53	61.21	1	20	Аш-Шарика	1250	25.37	55.41	1

Примечание. Звездочкой отмечены пункты, для которых баллы указаны по шкале MSK-64. Для остальных пунктов баллы даны по шкале Меркалли.

На рис. 5 представлена карта макросейсмических проявлений землетрясения 5 апреля в населенных пунктах, построенная по данным табл. 3. Данные аппроксимированы изолиниями равной интенсивности, при проведении которых мы принимали во внимание надежность ее оценок. Несмотря на противоречие общей картине сведений об ощутимости из пункта Дерезез с одним отзывом, в целом на карте изосейст четко прослеживается вытянутость изосейст в северо-западном направлении, совпадающей с ориентацией тектонических структур. Отмечается сильное затухание интенсивности вкост структур.

На рис. 6 показаны исходные данные и уравнение макросейсмического поля землетрясения 5 апреля 2017 г., установленное методом наименьших квадратов с учетом числа отзывов:

$$I=1.5 M-3.35 \lg r+2.38, R=0.75. \quad (2)$$

Свободный член $c=2.38$ в данном уравнении соответствует магнитуде при $M_{SISC}=6.0$. При $M_{S_{MOS}}=5.8$ $c=2.68$.

Для сравнения на рис. 6 приведено уравнение Блейка-Шебалина [10] со среднемировыми коэффициентами:

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

при $M=M_s=6.0$.

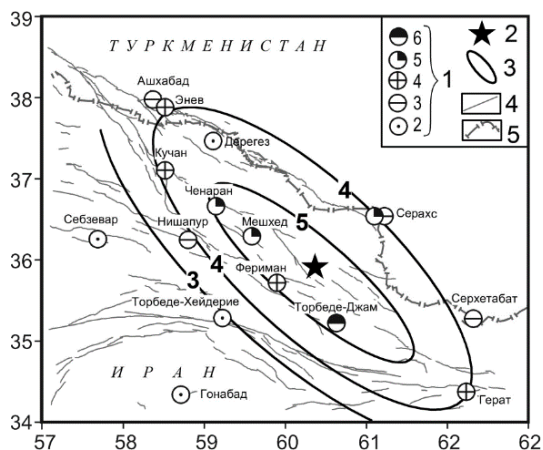


Рис. 5. Карта изосейст землетрясения 5 апреля 2017 г.

1 – интенсивность в населенных пунктах в баллах; 2 – инструментальный эпицентр по данным КОП [6]; 3 – изосейста; 4 – активный разлом согласно [5]; 5 – государственная граница.

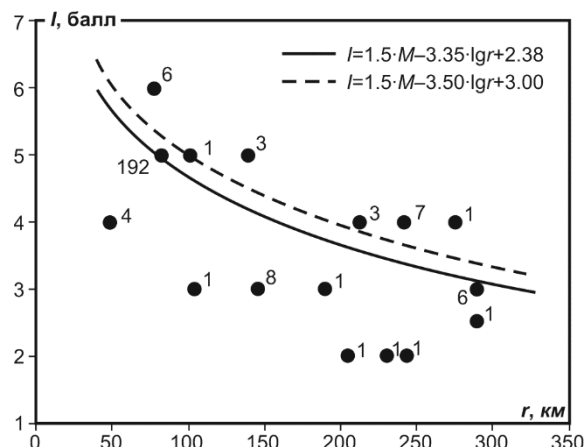


Рис. 6. Зависимость макросейсмических эффектов землетрясения 5 апреля 2017 г. от гипоцентрального расстояния

Для каждого значения интенсивности в населенном пункте (кружок) указано число отзывов. Сплошная линия – установленное уравнение (2), пунктир – уравнение Блейка-Шебалина [10] (3) со среднемировыми коэффициентами при $M=M_s=6.0$.

Удовлетворительное согласие этих зависимостей по уровню и коэффициенту затухания позволяет использовать для прогнозирования сейсмических воздействий от землетрясений данного района как наше уравнение (2), так и модель Шебалина (3) со среднемировыми коэффициентами. С использованием уравнения (2), при $M=M_{SISC}=6.0$ и $h=12$ км, получена оценка интенсивности в эпицентре $I_0=7.8$. Близкую оценку дает при тех же исходных параметрах уравнение (3) – $I_0=8.2$. Примем среднюю оценку, $I_0=8$ баллов, для этого землетрясения.

Землетрясение 13 мая 2017 г. в 18^h01^m с $K_p=13.4$, $M_w=5.7$ локализовано близ туркмено-иранской границы в 23 км к северу от г. Боджнурда на севере Ирана.

Инструментальные данные. Землетрясение зарегистрировано большинством сейсмических станций Туркменистана, но определение его кинематических и энергетических параметров произведено по 26 наиболее надежным станциям. Благодаря хорошему окружению эпицентра станциями в азимутальном створе 150° и наличию близко расположенных станций, в том числе ближайших «Мергеновля» и «Гермаб» типа Дельта Геон ($\Delta=35$ км и 45 км соответственно), ошибка определения эпицентра главного толчка составила $\delta r=\pm 6$ км, а ошибка глубины – $\delta h=\pm 2$ км. Основные параметры главного толчка и максимальных в 2017 г. афтершоков 19 мая с $K_p=10.9$ и 17 октября с $K_p=12.1$ ($M_{SISC}=3.5$) приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные параметры землетрясения 13 мая 2017 г. с $K_p=13.4$ по данным разных сейсмологических центров

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр			δr , км	Магнитуда	Источник
			φ° , N	λ° , E	h , км			
Главный толчок 13 мая 2017 г.								
КОП	18:01:01	0.62	37.690	57.310	22	6.0	$K_p=13.4/26$	[6]
ISC	18:01:02.03	0.34	37.773	57.194	14.0	1.9	$M_s=5.5/323$, $mb=5.5/353$	[7]
ISC-ЕНВ	18:01:02.32	–	37.691	57.158	14.5	1.4	$M_s=5.5/323$, $mb=5.5/353$	[7]
ТЕН	18:00:59.30	–	37.651	57.220	7.7	24.0	$M_L=5.7$	[7]
THR	18:01:00.00	0.81	37.743	57.202	17.9	8.0	$M_L=5.5$	[7]
MOS	18:01:00.60	1.97	37.793	57.265	23.0	–	$M_s=5.2/52$, $mb=5.6/55$	[7]
IDC	18:01:02.07	1.09	37.808	57.124	10.3	6.3	$M_s=5.3/73$, $mb=4.9/30$, $M_L=4.2/8$	[7]
NEIC	18:00:59.52	2.28	37.7693	57.2058	8.0	1.8	$mb=5.5/222$	[7]
GCMТ	18:01:01.50	0.10	37.6100	57.2200	12.0f	–	$M_w=5.7/155$	[7]
ВJI	18:00:59.60	–	37.7000	57.3000	5.0	–	$M_s=5.9/96$, $mb=5.3/83$, $mB=5.5/69$	[7]
Максимальный афтершок 17 октября 2017 г.								
КОП	18:52:37	0.64	37.67	57.22	10	6	$K_p=12.1/21$	[6]
ISC	18:52:36.52	0.72	37.8190	57.2431	9.4	4.9	$mb=4.6/69$, $M_s=3.5/29$	[7]
ТЕН	18:52:35.50	–	37.6870	57.2150	8.7	23.0	$M_L=4.7$	[7]
THR	18:52:37.20	1.09	37.6080	57.2150	15.0	5.7	$M_L=4.5$	[7]
IDC	18:52:36.06	0.83	37.6462	57.0810	0.0f	–	$mb=4.1/21$, $M_s=3.4/38$, $M_L=4.1/8$	[7]
NEIC	18:52:37.42	2.15	37.7462	57.3017	18.8	4.9	$mb=4.7/82$	[7]
Афтершок 19 мая 2017 г.								
КОП	11:27:27	0.76	37.79	57.29	24	8	$K_p=10.9/21$	[6]

Примечание. Δt_0 – ошибка определения времени в очаге; δr – большая полуось 90 % эллипса ошибок в км; f – фиксированная глубина. Через косую черту обозначено количество используемых станций. Для расшифровки названий агентств см. Примечания к табл. 1.

На рис. 7 а показаны решения разных агентств для эпицентров главного толчка и максимального афтершока 17 октября 2017 г. с $K_p=12.1$. Разница между данными КОП и другими решениями для эпицентра главного толчка не превышает $\delta\varphi=0.12^\circ$, $\delta\lambda=0.19^\circ$, для максимального афтершока – $\delta\varphi=0.13^\circ$, $\delta\lambda=0.23^\circ$. Глубины варьируют в решениях разных агентств для главного толчка в довольно широком диапазоне – $\delta h=5-23$ км, для максимального афтершока $\delta h=9-19$ км.

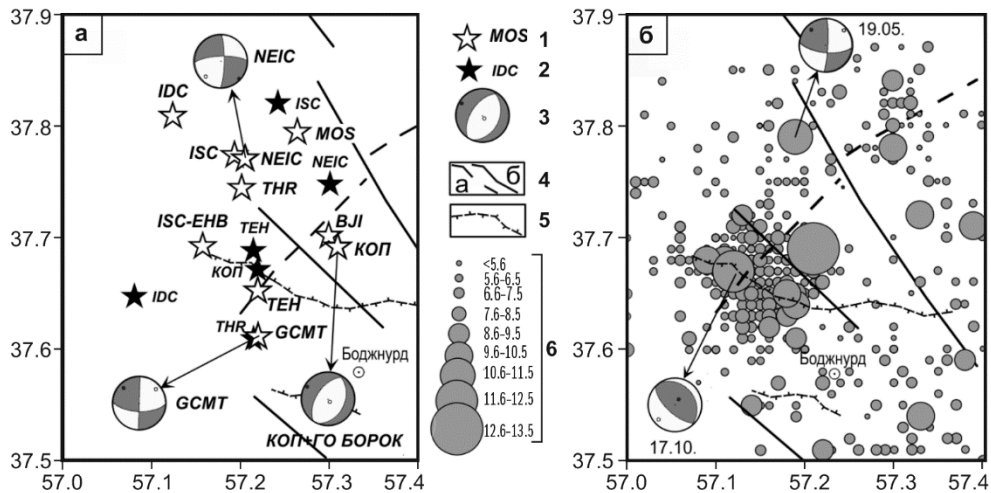


Рис. 7. Положение эпицентров главного толчка (а), его афтершоков (б) и диаграммы механизмов очагов максимальных событий 13 мая (а), 19 мая и 17 октября (б)

1 – эпицентр главного толчка с указанием агентства; 2 – то же для максимального афтершока 17 октября; 3 – диаграмма механизма очага по данным международных агентств для главного толчка (а) и по КОП+ГО БОРОК для афтершоков (б); 4 – активные разломы предполагаемые (а) и подтвержденные (б) согласно [5]; 5 – активные разломы согласно [11]; 6 – энергетический класс K_p .

Параметры механизма очага землетрясения 13 мая и его афтершоков по данным КОП+ГО БОРОК [8] и международных агентств приведены в табл. 2. Решение КОП+ГО БОРОК получено по знакам первых вступлений P -волн, тогда как в GCMT и NEIC использован метод тензора момента. Диаграммы механизма очага главного толчка, полученные разными агентствами, показаны на рис. 7 а, а двух крупнейших афтершоков – на рис. 7 б. Как видно из рис. 7 а, GCMT и NEIC дают для главного толчка сдвиг (с незначительной сбросовой компонентой по NEIC) по меридиональной или широтной плоскости, тогда как по данным КОП+ГО БОРОК в очаге преобладал сброс по плоскостям северо-восточного/юго-западного простирания. Ближайшие разломы по данным [5, 11] в районе очага имеют как северо-западную или близширотную ориентацию, так и, предположительно, северо-восточную (рис. 7), поэтому выбрать действующую плоскость разрыва, исходя из тектонических данных, не представляется возможным. Можно лишь предположить, что первое движение в очаге представляло собой сброс по плоскости северо-восточного простирания, совпадающей с предполагаемым разломом той же ориентации [11], а дальше разрыв развивался в виде сдвига по секущей плоскости северо-западного или близширотного простирания. Отметим, что механизм очага крупного афтершока 19 мая в $11^{\text{h}}27^{\text{m}}$ по данным КОП+ГО БОРОК [8] аналогичен механизму главного толчка по данным GCMT (рис. 7 а, б), что позволяет отнести его к афтершоковой серии, несмотря на его удаленность от эпицентра главного толчка на 11 км и обособленность от наиболее плотного облака афтершоков (рис. 7 б). Тип подвижки в очаге землетрясения 17 октября – взброс по крутой плоскости юго-восточного простирания, падающей на юго-запад, или надвиг по пологой плоскости северо-западного простирания, падающей на северо-восток. Он отличается от движений в очагах главного толчка и афтершока 19 мая (рис. 7 а, б), в которых преобладали сдвиговые или сбросовые компоненты, однако простирание обеих нодальных плоскостей события 17 октября совпадает с ориентацией активного разлома запад-северо-западного простирания из [5], к которому приурочен его эпицентр.

Таблица 5. Параметры механизмов очагов землетрясения 13 мая 2017 г. и его максимальных афтершоков

№ п/п	Дата д.мес.год	t_0 ч мин с	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						Агентство
			T		P		$NP1$			$NP2$			
			PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
Главный толчок 13 мая													
1	13.05.2017	18:01:01	9	302	81	140	214	54	-85	28	36	-94	КОП+ГО БОРОК [8]
			4	134	18	225	1	80	-164	268	75	-10	NEIC [7]
			17	314	17	50	2	90	155	92	65	0	GCMT [7]

№ п/п	Дата д.мес.год	t_0 ч мин с	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						Агентство
			T		P		NP1			NP2			
			PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
Максимальные афтершоки													
2	19.05.2017	11:27:27	21	317	11	51	96	67	8	3	83	157	КОП+ГО БОРОК [8]
3	17.10.2017	18:52:37	70	31	19	227	326	26	101	133	64	84	КОП+ГО БОРОК [8]

Афтершоки. Главный толчок 13 мая реализовался после трехмесячного сейсмического затишья в очаговой зоне, как это видно из графика пространственно-временного распределения сейсмичности в районе очага в течение 2017 г. (рис. 8). Размер зоны затишья составил 0.2° по широте ($37.6-37.8^\circ$) и 0.3° ($57.1-57.4^\circ$) по долготе. В пределах этой зоны сформировалась и область наибольшей плотности облака афтершоков (рис. 7 б).

До конца 2017 г. в радиусе 30 км от главного толчка зарегистрировано 510 сейсмических событий, из них 405 – представительного уровня с $K_p \geq 5.6$ [12]. На рис. 9 показан вертикальный разрез облака афтершоков в проекциях на широту и долготу. Если не принимать в расчет событий вне оконтуренной на рис. 8 области затишья, которые могут относиться к другим действующим сейсмоактивным зонам вблизи очага 13 мая, то на рис. 9 заметна концентрация афтершоков между широтами $37.6^\circ-37.72^\circ$ и долготами $57.17^\circ-57.34^\circ$ в диапазоне глубин 1–23 км. Обе проекции близвертикальны. Кажущееся падение облака на запад (см. проекцию на долготу на рис. 9) связано, скорее всего, с наложением сейсмичности восточной очаговой зоны ($\lambda=57.4-57.5^\circ$), которая была активна весь год (рис. 8).

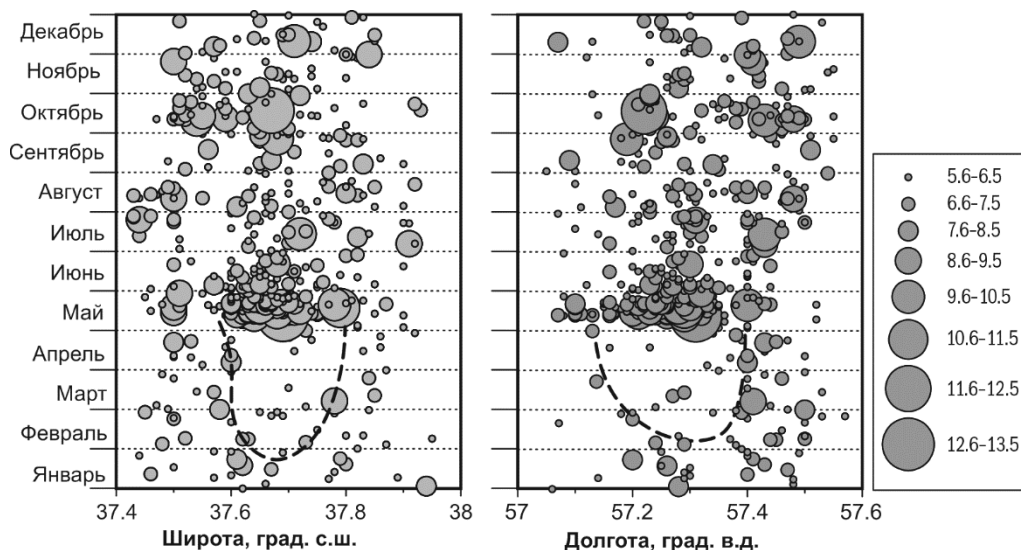


Рис. 8. Пространственно-временное распределение сейсмичности в районе очага землетрясения 13 мая 2017 г. с $K_p=13.4$ в течение 2017 г.

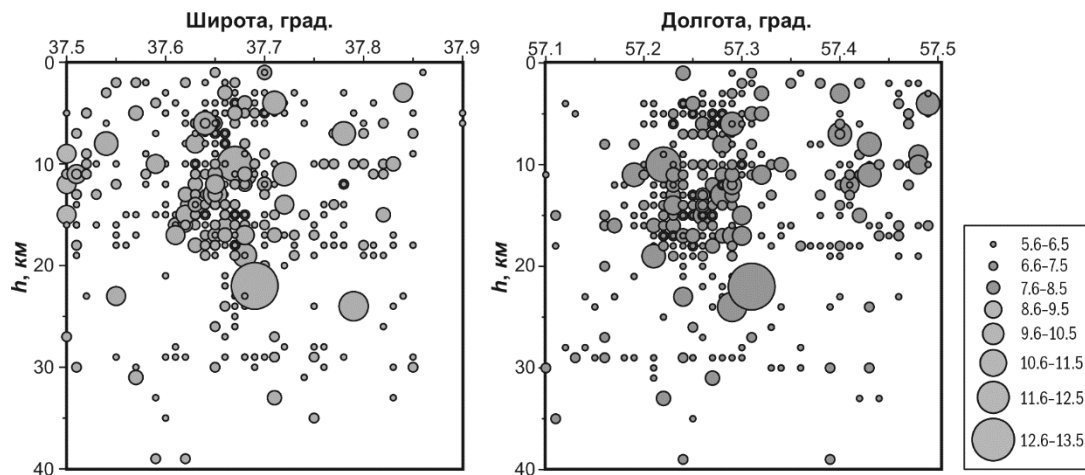


Рис. 9. Вертикальные разрезы облака афтершоков в проекции на широту и долготу

Макросейсмические данные. В Туркменистане полевые исследования последствий землетрясения 13 мая не проводились. Сведения о его ощутимости в табл. 6 приведены по опубликованным на сайте USGS [2] в разделе DYFI результатам Интернет-опроса. С максимальной интенсивностью 7 баллов землетрясение проявилось в иранском городе Боджнурде (24 км). В Туркменистане ощущались 4-балльные сотрясения в г. Ашхабаде (98 км) и пос. Энев (108 км). Наибольшее число отзывов получено из столицы Туркменистана Ашхабада (24) и двух крупных городов Ирана Боджнурда (17) и Мешхеда (13), указанных в табл. 6 ($N_{отз}$), а для остальных пунктов оценки сделаны по одному отзыву. На рис. 10 приведена карта ощутимости землетрясения 13 мая в населенных пунктах. Из-за небольшого числа и противоречивости данных (по пунктам Ширван, Кучан) карту изосейст построить не удалось.

Таблица 6. Макросейсмические данные о землетрясении 13 мая 2017 г. в 18^h01^m с $K_p=13.4$

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	$N_{отз}$	№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	$N_{отз}$
7 баллов						2 балла					
1	Боджнурд	24	37.47	57.32	17	7	Ширван	63	37.40	57.93	1
4 балла						8	Гомбеде-Кабус	195	37.25	55.17	1
2	Ашхабад	98	37.96	58.37	24	9	Сольтанабад	297	35.18	58.45	1
3	Энев	108	37.89	58.51	1	10	Кабул	1120	34.53	69.16	1
4	Ченаран	198	36.64	59.12	1	1 балл					
5	Мешхед	255	36.27	59.57	13	11	Тегеран	570	35.67	51.43	1
3 балла											
6	Кучан	125	37.10	58.51	1						

Примечание. Баллы даны по шкале Меркалли MMI.

На основе данных табл. 6 установлено уравнение макросейсмического поля (рис. 11):

$$I=1.5Ms-3.851g r+4.06, R=0.75. \quad (4)$$

При этом использовался метод наименьших квадратов с учетом числа отзывов, коэффициент затухания $\nu=3.85$ получен для $h=22$ км, а коэффициент $c=4.06$ соответствует $M=M_{SISC}=5.5$.

Из рис. 11 видно, что уравнение (4) хорошо согласуется как со среднемировым уравнением Блейка-Шебалина (3), так и с аналогичным уравнением для региона «Западная Туркмения» (подразумевается весь Копетдагский регион до 60° в.д.) из [10]:

$$I=1.5M-3.81g r+3.5. \quad (5)$$

При $M=M_{SISC}=5.7$ и $h=22$ км из уравнения (4) получена оценка интенсивности в эпицентре $I_0=7.4$ ($I_0=7-8$ баллов). Одинаковые оценки $I_0=6.9$ дают уравнения (3) и (5) при тех же исходных параметрах. С учетом 7-балльных сотрясений в г. Боджнурде наша оценка $I_0=7-8$ баллов представляется наиболее соответствующей действительности.

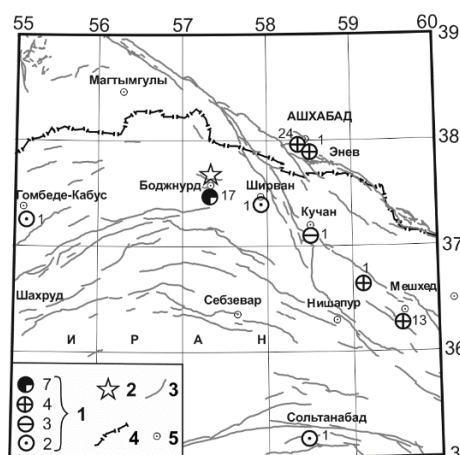


Рис. 10. Карта макросейсмических проявлений землетрясения 13 мая 2017 г. в населенных пунктах Ирана и Туркменистана

1 – интенсивность в баллах по шкале MMI, рядом со значением указано число отзывов; 2 – инструментальный эпицентр по данным КОП [6]; 3 – активный разлом согласно [5]; 4 – государственная граница; 5 – город.

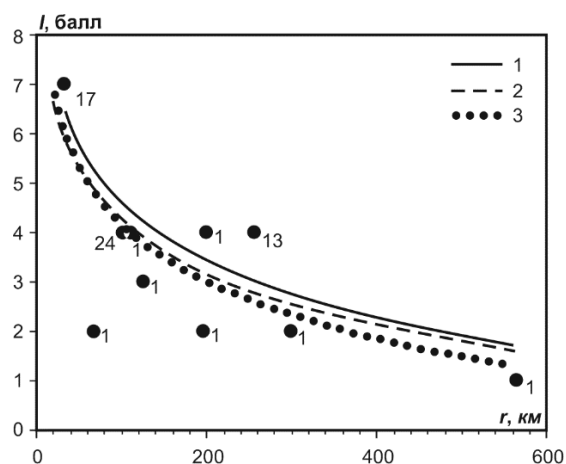


Рис. 11. Зависимость макросейсмических эффектов землетрясения 13 мая 2017 г. от гипоцентрального расстояния с указанием числа отзывов в каждом пункте

1 – установленное уравнение (4); 2 – уравнение (3) Блейка-Шебалина [10] со среднемировыми коэффициентами при $M=M_s=6.0$; 3 – уравнение (5) для Западной Туркмении из [10].

Заключение. В 2017 г. в центральном и восточном Копетдаге произошли два крупнейших за два последних десятилетия землетрясения: 5 апреля с $K_R=14.3$, $M_{WGCMT}=6.0$ и 13 мая с $K_R=13.4$, $M_{WGCMT}=5.7$. Землетрясение 5 апреля явилось к тому же самым сильным в радиусе 45 км от его эпицентра – за всю сейсмическую историю здесь не известны землетрясения подобной магнитуды.

Для землетрясения 5 апреля построена карта изосейст и определена их северо-западная ориентация, совпадающая с ориентацией ближайших разломов, облака афтершоков и одной из нодальных плоскостей механизма очага. Обнаружено юго-западное падение облака афтершоков, не соответствующее северо-восточному падению выбранной в качестве действующей нодальной плоскости и свидетельствующее, по-видимому, о сложной структуре разломной зоны, либо с участками разнонаправленного падения, либо с двумя параллельными разломами, плоскости которых падают на северо-восток и на юго-запад. Установлено уравнение макросейсмического поля, согласно которому интенсивность сотрясений в эпицентре составила $I_0=8$ баллов.

Для землетрясения 13 мая 2017 г. в центральном Копетдаге, предварявшегося трехмесячным сейсмическим затишьем, определены границы зоны затишья, исследованы пространственно-временные особенности афтершокового процесса, установлены закон затухания количества афтершоков и модель распространения сейсмического эффекта, на основе которой получена интенсивность в эпицентре – $I_0=7-8$ баллов.

Л и т е р а т у р а

1. Khosravi H., Doloei G.J., Tatar M., Safari M. Analysis of the Do-Ghaleh Fariman Mw6 Earthquake on 5 April 2017 and its aftershocks based on IIEES local Seismic Network // Journal of the Earth and Space Physics. – 2019. – V. 45, № 3. – P. 487–505. doi: 10.22059/jesphys.2019.264187.1007032
2. Search Earthquake Catalog // USGS [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
3. Сарыева Г.Ч., Петрова Н.В., Безменова Л.В. Сейсмичность Копетдагского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 87–96. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.07. EDN: QYHBBK
4. Гаипов Б.Н., Голинский Г.Л., Петрова Н.В., Ильясов Б.И., Мурадов Ч.М., Рахимов А.Р., Безменова Л.В., Гаргозов Д., Ходжаев А., Баймурадов К., Рахманова М.С. Боджнурдское землетрясение 4 февраля 1997 г. с $M_S=6.6$, $I_0=8$ (Копетдаг) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск: ГС РАН, 2003. – С. 199–218.
5. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 711–736.
6. Сарыева Г.Ч. (отв. ост.); Тачов Б., Халаева А.Т., Дурасова И.А., Эсенова А., Халлыева Т., Смирнова Т., Велиева Г., Союнова М., Хрулева О.С., Союнмурадова С. Каталог землетрясений с $K>8.6$ Копетдага за 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-25.html>
7. International Seismological Centre. (2022). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
8. Петров В.А., Безменова Л.В. (отв. ост.); Петрова Н.В. Каталог механизмов очагов землетрясений Копетдага за 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-25.html>
9. Iranian Seismological Centre. (2022). Online Databank. – URL: <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>
10. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. – М.: Наука, 1977. – С. 20–30.
11. Generalized fault map of Iran. Scale 1: 5 000 000 // Ministry of industry and mines. Geological Survey of Iran. Report № 39.1976 / Compiled by Manuel Berberian. – Tehran, 1976.
12. Петрова Н.В., Абасеев С.С., Безменова Л.В. Кёнекесирское землетрясение 12 октября 2015 г. ($M_W=5.2$) в Западном Копетдаге: афтершоковая серия и сильные движения грунта // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2021. – Т. 48, № 4. – С. 5–31. doi: 10.21455/VIS2021.4-1

STRONG and FELT EARTHQUAKES of the TURKMEN-KHORASAN MOUNTAINS in 2017

N.V. Petrova¹, G.Ch. Saryeva², L.V. Bezменова², A.D. Kurova¹

¹Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, npetrova@gsras.ru

²Institute of Seismology and Atmospheric Physics of the Academy of Sciences of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan, tm.seismology@online.tm

Abstract. In 2017, the strongest earthquakes over the past two decades occurred in the central and south-eastern Kopetdag – on April 5 with $K_R=14.3$, $M_{WGCMT}=6.0$ and on May 13 with $K_R=13.4$, $M_{WGCMT}=5.7$. The April 5

earthquake was also the strongest during the entire seismic history of a zone with a radius of 45 km from the epicenter. Both events were felt in the settlements of Iran, Turkmenistan, Afghanistan and other countries. The maximum shaking intensity was recorded in the nearest settlements of Iran – $I=6$ in the city of Torbet Jam during the earthquake on April 5 and $I=7$ in the city of Bojnurd during the event on May 13. For the earthquake of April 5, located in the contact zone of the southeastern Kopetdag with Binalud mountains, an isoseist map is constructed, on the basis of which the northwestern orientation of the isoseists are determined, coinciding with the strike of the nearest faults, of the aftershock cloud and of one of the nodal planes of the focal mechanism. At the same time, a southwest dip of the aftershock cloud is found, which does not correspond to the northeast dip of the nodal plane chosen as the active one. This discrepancy apparently indicates the complex structure of the fault zone, with areas of dip in different directions or with two parallel faults, which planes are dipping to the northeast and southwest. For the earthquake of May 13, 2017 in the central Kopetdag, which was preceded by a three-month seismic calm, the calm zone boundaries are defined, the spatial and temporal features of the aftershock process are studied. According to the determined equation of macroseismic effect propagation, the intensity at the epicenter of the May 13, 2017 earthquake is obtained – $I_0=7-8$. This estimate is confirmed by the 7-point shaking intensity in Bojnurd ($\Delta=24$ km).

Keywords: energy class, magnitude, seismic activity, seismic calm, foreshock, aftershock, focal mechanism, shaking intensity.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.29 **EDN:** JPXWLN

For citation: Petrova, N.V., Saryeva, G.Ch., Bezmenova, L.V., & Kurova, A.D. (2022). [Strong and felt earthquakes of the Turkmen-Khorasan mountains in 2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 315–326. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.29. EDN: JPXWLN

References

1. Khosravi, H., Doloei, G.J., Tatar, M., & Safari, M. (2019). Analysis of the Do-Ghaleh Fariman Mw6 Earthquake on 5 April 2017 and its aftershocks based on IIEES local Seismic Network. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(3), 487–505. doi: 10.22059/jesphys.2019.264187.1007032
2. Search Earthquake Catalog. USGS. (2022). Retrieved from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
3. Saryeva, G.Ch., Petrova, N.V., & Bezmenova, L.V. (2022). [Seismicity of the Kopetdag region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 87–96. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.07. EDN: QYHBBK
4. Gaipov, B.N., Golinsky, G.L., Petrova, N.V., Ilyasov, B.I., Muradov, Ch.M., Rakhimov, A.R., Bezmenova, L.V., Garagozov, D., Khodjaev, A., Baimuradov, K., & Rakhmanova, M.S. (2003). [Bojnurd earthquake on February 4, 1997 with $M_S=6.6$, $I_0=8$ (Kopetdag)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 1997 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 1997] (pp. 199–218). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
5. Bachmanov, D.M., Kozhurin, A.I., & Trifonov, V.G. (2017). Database of active faults in Eurasia. *Geodynamics and tectonophysics*, 8(4), 711–736.
6. Saryeva, G.Ch., Tachov, B., Hallaeva, A.T., Durasova, I.A., Esenova, A., Khallyeva, T., Smirnova, T., Velieva, G., Soyunova, M., Khruleva, O.S., & Soyunmuradova, S. (2022). [Catalog of the Kopetdag earthquakes with $K_R \geq 8.6$ for 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-25.html> (In Russ.).
7. International Seismological Centre. (2022). On-line Bulletin. Retrieved from: <https://doi.org/10.31905/D808B830>
8. Petrov, V.A., Bezmenova, L.V., & Petrova, N.V. (2022). [Catalog of focal mechanisms of the Kopetdag earthquakes in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-25.html> (In Russ.).
9. Iranian Seismological Centre. (2022). Online Databank. Retrieved from: <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>
10. Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (1977). In *Novyy katalog sil'nykh zemletryasenyi na territorii SSSR s drevnikh vremen do 1975 g.* [A new catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times to 1975] (pp. 20–30). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
11. Berberian, M. (1976). Generalized fault map of Iran. Scale 1: 5 000 000. *Ministry of industry and mines. Geological Survey of Iran. Report № 39.1976.*
12. Petrova, N.V., Abaseev, S.S., & Bezmenova, L.V. (2022). Kenekesir Earthquake of October 12, 2015 ($M_W=5.2$) in the Western Kopet Dag: Aftershock Series and Strong Ground Motions. *Seismic Instruments*, 58(1), 63–85. doi: 10.3103/S0747923922010091