

**ЧАЛУССКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 28 мая 2004 г. с  $M_s=6.3$ ,  $I_0 \sim 8$  (Копетдаг)****Н.В. Петрова<sup>1</sup>, Р.С. Михайлова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Институт сейсмологии АН Туркменистана, г. Ашхабад, [gaipsr@online.tm](mailto:gaipsr@online.tm)<sup>2</sup>Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, [raisa@gsras.ru](mailto:raisa@gsras.ru)

28 мая в 12<sup>h</sup>38<sup>m</sup> в 25 км от иранского г. Чалус и в 85 км от Тегерана (рис. 1) произошло землетрясение с  $M_S=6.1$  [1],  $M_w=6.3$  [2] на южном побережье Каспийского моря на одном из участков Хазарского разлома [3].

По данным NEIC [2], землетрясение было записано огромным ( $n=1345$ ) числом станций мировой сети (табл. 1) и ощущалось на большей части территории Центрального и Северного Ирана. По ближайшему населенному пункту его можно назвать Чалусским. Сообщалось о 35 погибших и 400 раненых в провинциях Казвин и Мазандаран, об оползнях на дороге Тегеран-Чалус, вызвавших несколько смертельных случаев. В самом Тегеране повреждения были незначительны. По данным ГС РАН [1], землетрясение ощущалось в Азербайджане (Ленкорань – 3–4 балла, Баку – 2–3 балла) и Дагестане (Махачкала – 2 балла). На территории Туркменистана сведения об ощущимости этого землетрясения отсутствуют [4].

Расчетная интенсивность сотрясений  $I_0$  в эпицентре для магнитуды  $M_w=6.3$  и двух значений глубины гипоцентра  $h=17$  км (по годографу),  $h^*=29$  км (по фазе  $pP$ ) из [2], с использованием усредненного уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина [5, 6]:

$$I_0=1.5 M - 3.5 \lg h + 3.0 \quad (1)$$

составляет 8.1 или 7.3 балла, а по уравнению Г.Л. Голинского для Копетдага [7]:

$$I_0=1.5 M - 3.8 \lg h + 3.5 \quad (2)$$

– 8.3 или 7.4 балла, т.е. оценки весьма близки по обеим формулам. В целом расчетные данные и факты оползней на дорогах и многочисленных жертвах свидетельствуют об интенсивности  $I_0$ , близкой к 8 баллам.

**Параметры** Чалусского землетрясения, определенные различными сейсмологическими центрами, представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные параметры Чалусского землетрясения 28 мая 2004 г. с  $M_w=6.3$  по данным сейсмической службы Туркменистана (КОП) в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство, число станций	$t_0$ , ч мин с	$\delta t_0$ , с	Гипоцентр					Магнитуда		Источ- ник
			$\varphi^\circ$ , N	$\delta\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$ , E	$\delta\lambda^\circ$	$h$ , км	$\delta h$ , км		
КОП, $n=20$	12 38 42	1.06	36.68	0.32	51.12	0.32	60	3	$MPVA=7.3/14$ , $K_p=14.0$	[4]
MOS, $n=162$	12 38 46.3	1.1	36.47		51.61		33f		$MS=6.1/38$ , $MPSP=6.2/52$	[2]
ISC, $n=1345$	12 38 43.0	0.1	36.32	0.02	51.59	0.01	17 29*	1*	$M_s=6.3/175$ , $m_b=6.2/303$ , $h^*$ по $pP$	[3]
NEIC, $n=732$	12 38 44.5	0.1	36.29		51.61		17		$M_w=6.2$ , $M_s=6.3/121$ , $m_b=6.2/190$	[3]
IDC, $n=16$	12 38 44.5	1.0	36.31		51.62		16	6	$M_s=6.2/26$ , $m_b=5.6/39$	[3]
HRVD, $n=22$	12 38 44.3	0.2	36.55		51.58		22		$M_w=6.3/76$	[3]
ZUR, $n=14$	12 38 44		36.25		51.62		30		$M_w=6.5/14$	[3]

Как видим из рис. 1, разные решения эпицентра Чалусского землетрясения сгруппировались частично южнее Хазарского разлома в зоне сближения его с надвиговой зоной близширотного простирания (ISC, ILC, NEIC), частично – севернее (MOS, HRVD), в зоне параллельных с ним двух других разломов меньшего порядка и, наконец, одно решение удалено от остальных на 40–55 км к северо-западу. Это решение получено по данным региональной сети

Копетдага. Такая же тенденция сдвига эпицентров к северо-западу, по данным КОП, имеет место и у всех афтершоков (рис. 2), которые, к тому же, рассеяны на большой площади, тогда как эпицентры афтершоков, по данным ISC, образуют компактную протяженную область.

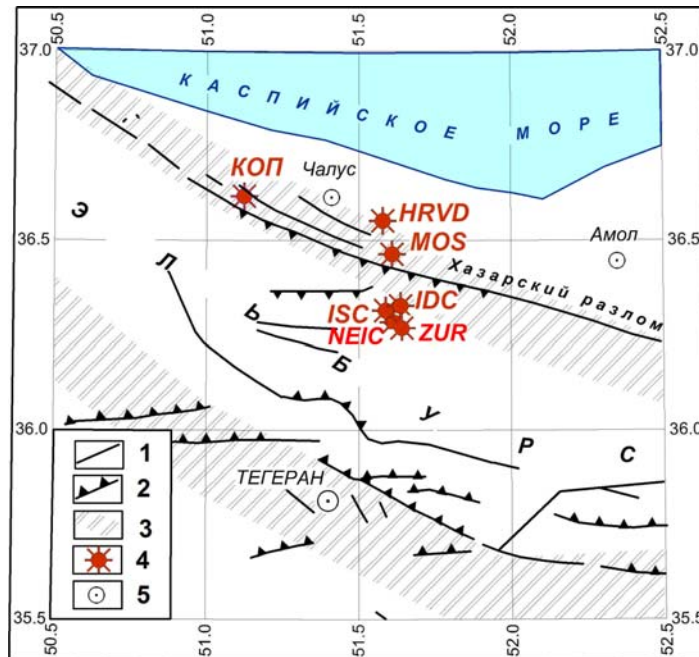


Рис. 1. Решения эпицентра Чалусского землетрясения с  $M_w=6.3$  по данным различных агентств

Четвертичные разломы согласно [8]: 1 – сдвиг, 2 – надвиг; 3 – сейсмогенерирующая зона; 4 – эпицентр землетрясения 28 мая по данным разных сейсмологических центров; 5 – город.

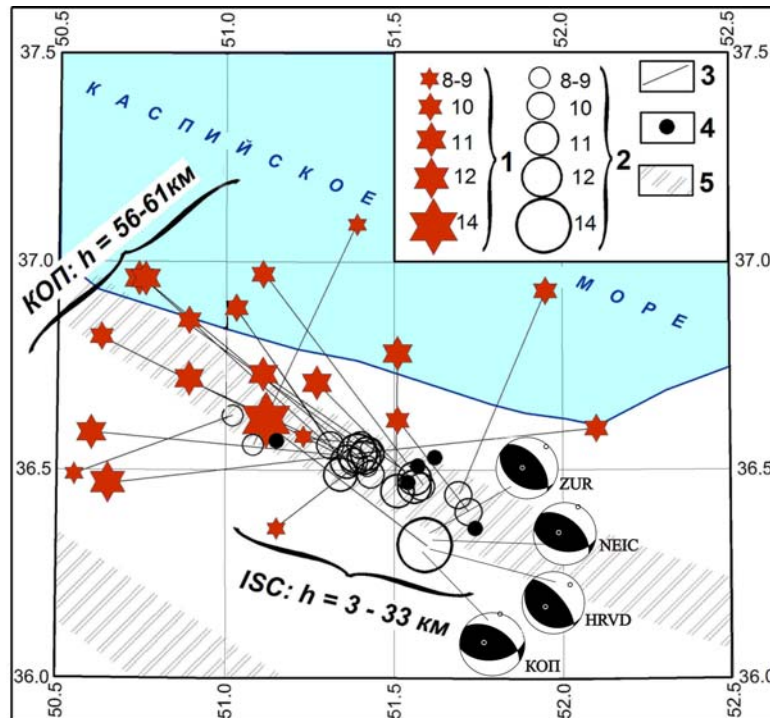


Рис. 2. Сопоставление координат афтершоков землетрясения 28 мая с  $M_S=6.3$  по данным сейсмических станций Туркменистана (КОП) [4] и международного сейсмологического Центра (ISC) [2]

1 – эпицентры землетрясений с градацией по энергетическим классам  $K_p$  по данным КОП; 2 – то же по данным ISC (магнитуды  $m_b$  ISC переведены в классы по формуле  $K_p = 2.0 m_b + 2.8$  из [9]); 3 – расстояние между эпицентрами по данным КОП и ISC; 4 – эпицентры землетрясений из бюллетеня ISC, не зарегистрированные КОП; 5 – сейсмогенерирующая зона.

Учитывая, с одной стороны, одностороннее расположение сейсмических станций Туркменистана относительно данной эпицентральной зоны, небольшое их число и значительное удаление ( $\Delta \geq 340$  км), а с другой – хорошую сходимость данных других агентств, следует отдать предпочтение определениям координат гипоцентров землетрясений этой зоны Международным сейсмологическим центром ISC [2].

**В тектоническом плане** любое из определений координат эпицентра главного толчка 28 мая на рис. 1 приурочено к Хазарскому разлому, отделяющему с севера горную дугу Эльбурса от Южно-Каспийского бассейна. Согласно [8], тип движений по Хазарскому разлому – надвиг южного крыла на северное. Возраст гранитов в центральном Эльбурсе подтверждает его быстрый подъем, примерно синхронный опусканию Каспия [10]. Авторы работы [11] на основе анализа надежно определенных механизмов очагов, результатов полевых исследований и аэрофотоснимков считают, что движения по разломам, параллельным простиранию Эльбурса, представляют собой либо надвиги, либо левосторонние сдвиги, причем последние наиболее доказаны на долготах больше  $52^\circ$  и по разломам, обрамляющим Эльбурс с юга. Отсюда следует вывод, что кора Ирана надвигается на Южно-Каспийский бассейн и Эльбурс полностью регулирует это движение [12].

**Механизм очага** Чалусского землетрясения по региональным данным (рис. 2 [13]) поддерживает данную концепцию. В очаге произошел взброс (надвиг) по широтной плоскости, падающей на юг (*NP1*), или взброс по плоскости северо-западного простирания, падающей на север (*NP2*). Нодальная плоскость *NP1* более предпочтительна, так как отражает процесс надвига Эльбурса на Южно-Каспийский бассейн, а не наоборот. Близкие решения получены еще в трех агентствах – HRVD, NEIC и ZUR (табл. 2, рис. 2).

**Таблица 2.** Параметры механизма очага Чалусского землетрясения 28 мая 2004 г. с  $M_w=6.3$  и его семи афтершоков

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	$h$ , км	Магнитуды			$K_p$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
				$M_w$	$M_S$	$M_{PSP}$		<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			
								<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Главный толчок																				
10	28.05	12 38 42	60		6.1	6.2	14.0	69	286	21	110	1	19	89	48	61	308	50	118	КОП
		12 38 44.3	22	6.3	6.3	*6.2		67	244	7	136	21	43	119	24	72	319	67	98	HRVD
		12 38 44.5	17	6.2				74	283	16	117	4	26	100	43	67	310	51	110	NEIC
		12 38 44.36	30	6.5				78	275	10	132	7	41	320	53	102	120	39	74	ZUR
Афтершоки																				
11	28.05	13:15:09	61			*4.3	11.0	22	165	42	53	40	275	302	44	-15	44	79	-132	КОП
12	28.05	19:46:59	60			*4.2	11.1	40	118	50	285	6	23	257	68	35	152	58	154	КОП
13	29.05	09:23:40	61			*4.8	12.3	0	113	75	203	15	23	67	80	-9	159	80	-169	КОП
14	29.05	18:38:05	60			*4.3	10.6	24	266	50	27	31	161	212	86	-39	306	50	-173	КОП
15	30.05	01:42:36	60			*4.1	10.8	63	158	27	343	2	252	317	49	54	186	53	125	КОП
16	30.05	13:09:50	56			*4.2	10.4	35	222	55	48	3	314	4	64	24	262	69	152	КОП
17	30.05	19:26:59	59			*4.3	11.2	67	195	7	88	22	355	72	24	72	271	68	98	КОП

Примечание. Номера землетрясений в графе 1 соответствуют таковым в [13].

Для семи афтершоков с  $K_p \geq 10.4$  определены механизмы очагов [13], приведенные в табл. 2. Подвижки в основном носили взбросо-сдвиговый и надвиговый характер (стереограммы № 12, 15, 16, 17 на рис. 3), за исключением сдвигов с компонентами сброса для землетрясений № 11, 13 и 14.

Однако если выбирать нодальные плоскости, совпадающие с простиранием Хазарского разлома, сбросовыми компонентами движений в очагах этих землетрясений можно пренебречь. Примечательно, что практически для всех афтершоков, в очагах которых присутствовали компоненты сдвига по простиранию, по широтным и северо-западным (юго-восточным) нодальным плоскостям, совпадающим с ориентацией Хазарского разлома, происходили правостдвиговые смещения. Левосторонний сдвиг по плоскости северо-западного простирания зарегистрирован только при землетрясении № 11.

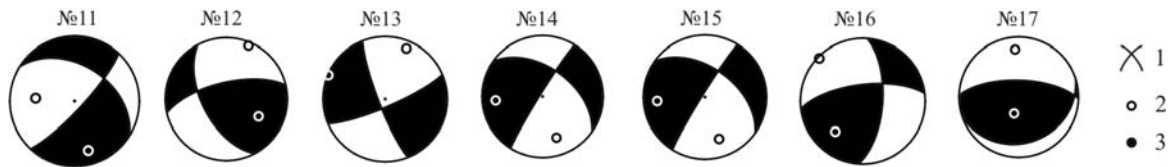


Рис. 3. Стереогаммы механизмов очагов афтершоков Чалусского землетрясения в проекции нижней полусферы

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

**Форшоки.** Для исследования сейсмичности, предшествующей главному толчку и после него, была выбрана обширная область в пределах координат  $\varphi=35.0-37.5^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=50.0-53.0^{\circ}\text{E}$  за период с 1 января по 31 декабря 2004 г. По данным ISC [2], на этой территории имело место абсолютное затишье с начала года и вплоть до главного толчка (рис. 3).

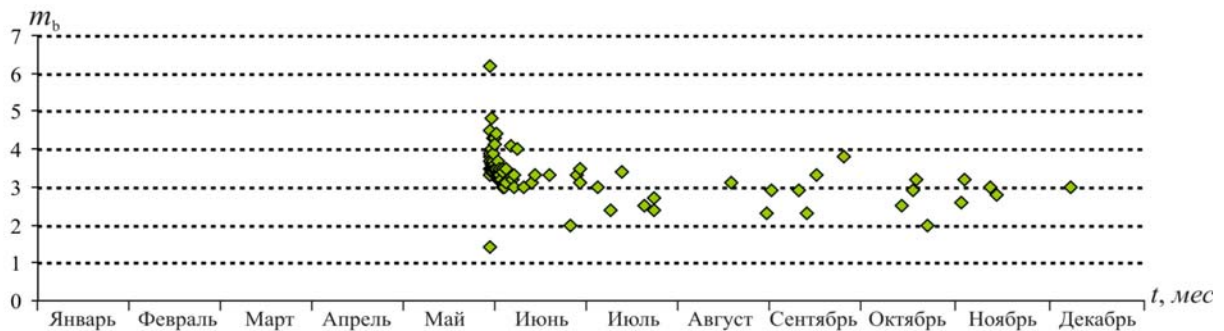


Рис. 3. Развертка во времени магнитуд зарегистрированных землетрясений по [2] в пределах координат  $\varphi=35.0-37.5^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=50.0-53.0^{\circ}\text{E}$  с 1 января по 31 декабря 2004 г.

Но, по данным каталога землетрясений Копетдага с  $K_p \geq 8.6$  [4], за это время в указанных координатах зарегистрированы три землетрясения, произошедшие 19 февраля с  $K_p=10.7$ , 13 апреля с  $K_p=9.5$  и, наконец, 28 мая с  $K_p=9.3$ , т.е. за 12<sup>h</sup> до главного толчка. По-видимому, лишь последний из них можно считать форшоком.

**Активное последствие** вслед за главным событием проявилось, как следует из рис. 4, практически на всей выбранной площади, концентрируясь в двух полосах северо-западного простирания вдоль двух разломов (см. рис. 1), т.е. активная разрядка тектонических напряжений в зоне Хазарского разлома индуктивно вызвала слабую сейсмичность в соседнем разломе. Непосредственно афтершоки Чалусского землетрясения сконцентрированы в пределах координат  $\varphi=36.25-36.75^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=51.00-51.75^{\circ}\text{E}$ .

Для количественного анализа сейсмической активности очаговой зоны и ее окрестностей составлен общий список землетрясений за период с 1 января по 31 декабря 2004 г. на выбранной территории, помещенный в дополнительных данных [14]. Источниками сведений о каждом землетрясении явились данные агентств КОП, ISC и THR (Иран). Суммарное число землетрясений равно  $N=88$ , из которых 17 имеются во всех трех источниках, но есть и такие, которые содержатся только в одном из них: 4 – в ISC, 8 – в КОП и больше всего (45) – по данным Ирана (THR) [14].

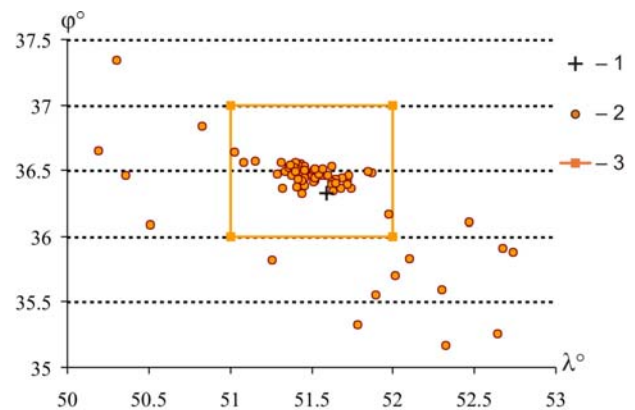


Рис. 4. Поле эпицентров землетрясений за 2004 г. в очаговой области Чалусского землетрясения и ее окрестностях

1, 2 – инструментальный эпицентр главного толчка и других землетрясений; 3 – граница очаговой области.

Классификация событий в [14] соответствует энергетическим классам  $K_p$  [11] в КОП [4], магнитудам типа  $M_s$ ,  $m_b$  – в ISC [2],  $ML$  – в THR [2]. Для ее унификации нужно было пересчитать разные магнитуды в энергетические классы. Переход от  $m_b$  к  $K_p$  исследован в статье [9] наст. сб., где получено приведенное выше уравнение:

$$K_p = 2 m_b + 2.8. \quad (3)$$

Переход от  $ML$  к классам  $K_p$  исследован непосредственно по немногочисленным данным в [14], представленным графически на рис. 5.

Уравнение связи имеет вид:

$$K_p \approx 2 ML + 2.3. \quad (4)$$

Используя формулы (3) и (4), проведен пересчет магнитуд  $m_b$  и  $ML$  в энергетические классы во всех тех случаях, когда не было данных КОП. Результат содержится в [14].

Представляет интерес оценка расчетного значения энергетического класса главного толчка, используя уравнения (3) и (4) функций  $K_p=f(m_b)$ ,  $K_p=f(ML)$ , а также уравнения из [9] еще двух функций связи  $K_p$  с магнитудами  $MS(MOS)$  и  $MS(ISC)$  по поверхностным волнам, а также с магнитудой объемных волн по короткопериодной аппаратуре  $MPVA$  [16]:

$$K_p = 1.47 MS + 5.96, \quad (5)$$

$$K_p = 2.0 MS + 2.15, \quad (6)$$

$$K_p = 1.46 MS + 5.80, \quad (7)$$

$$K_p = 1.74 MPVA + 2.36. \quad (8)$$

Как следует из табл. 1, исходные магнитуды для главного толчка равны:  $m_b=6.2$ ,  $ML=6.3$ ,  $MS=6.1$ ,  $MPSP=6.2$ ,  $MS=6.3$ ,  $MPVA=7.3$ , а расчетные по ним значения  $K_p$  равны 15.2( $m_b$ ), 14.9( $ML$ ), 14.9( $MS$ ), 14.6( $MPSP$ ), 15.0( $MS$ ), 15.1( $MPVA$ ) соответственно, т.е. все расчетные значения  $K_p$  на единицу больше  $K_p=14.0$  по [4]. Среднее расчетное значение равно  $K_p=14.95\sim 15.0$ . По-видимому, региональное значение энергетического класса Чалусского землетрясения в каталоге [4] занижено.

**Афтершоки** хорошо видны в виде компактной группы повышенной плотности эпицентров, расположенной в центральной части малого квадрата ( $\varphi=36.3\text{--}36.7^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=51.0\text{--}51.9^\circ\text{E}$ ) на рис. 2, 4. Размеры области афтершоков следующие: продольная ось, вытянутая вдоль Хазарского разлома, равна  $\ell_{\parallel}=26$  км, поперечная –  $\ell_{\perp}=16$  км.

Среди афтершоков, последовавших сразу же за основным толчком, максимальный реализовался 29 мая в  $09^{\text{h}}23^{\text{m}}$  с  $K_p=12.3$ . Зарегистрировано также семь афтершоков с  $K_p \div 11$ , десять с  $K_p \div 10$  и несколько более слабых с  $K_p=8\text{--}9$ . Общее число афтершоков составило  $N_{\Sigma}=67$  [14]. Затухает серия достаточно быстро, в основном до 12 июня (рис. 6), хотя редкие одиночные афтершоки тянутся вплоть до 21 октября [14].

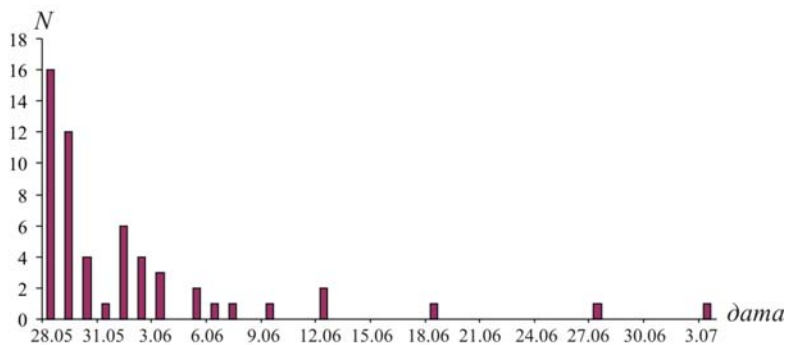


Рис. 6. График затухания афтершоков Чалусского землетрясения во времени

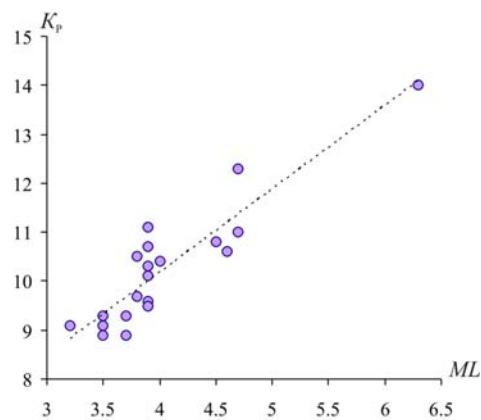


Рис. 5. Корреляционное поле функции  $K_p=f(ML)$

## Л и т е р а т у р а

1. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2004 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2004–2005.
2. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2004.** – Berkshire: ISC, 2006–2007.
3. **Гаипов Б.Н., Петрова Н.В., Безменова Л.В., Сарыева Г.Ч.** Копетдаг. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
4. **Сарыева Г.Ч. (отв. сост.), Тачов Б., Мамедязова М.Т., Халлаева А.Т., Коржукова Т.А., Дурасова И.А., Клычева Э.Р., Эсенова А., Петрова Н.В., Мустафаев Н.С.** Каталог землетрясений Копетдага за 2004 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
5. **Шебалин Н.В.** Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. – М.: Наука, 1975. – С. 87–109.
6. **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.
7. **Голинский Г.Л.** Уравнения макросейсмического поля землетрясений Туркмении // Изв. АН ТССР. – Сер. ФТХ и ГН. – 1977. – № 1. – С. 69–74.
8. **Berberian M.** Historical Seismicity (pre 1900) Map of Iran. Scale 1:5000000 // Geological Survey of Iran, Tectonic-Seismotectonic Research Section. – 1977.
9. **Петрова Н.В.** Соотношения между оценками величины землетрясений Копетдага по данным различных сейсмологических центров. (См. раздел V (Методические вопросы) в наст. сб. на CD).
10. **Axen G.J., Lam P.S., Grove M., Stockli D.F.** Exhumation of the west-central Alborz mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics // *Geology*. – 2001. – **29**. – 559–562.
11. **Jackson J., Priestley K., Allen M. and Berberian M.** Active tectonics of the South Caspian Basin // *Geophys. J. Int.* – 2002. – **148**. – P. 214–245.
12. **Berberian M.** The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust // *Canad. J. Earth Sci.* –
13. **Безменова Л.В., Петров В.А., Петрова Н.В. (отв. сост.)**. Каталог механизмов очагов землетрясений Копетдага за 2004 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
14. **Сарыева Г.Ч., Артёмова Е.В., Михайлова Р.С.** Землетрясения очаговой зоны Чалусского землетрясения 28.05.2004 г. с 1 января по 31 декабря 2004 г. в пределах координат 35.0–37.5°N и 50.0–43.0°E. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
15. **Раутиан Т.Г.** Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
16. **Рахимов А.Р., Соловьёва О.Н., Арбузова Г.Н.** Определение магнитуды землетрясений Туркмении на эпицентральных расстояниях до 400 км // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. – 1983. – № 5. – С. 61–65.