

КОПЕТДАГ

Л.В. Безменова¹, Н.В. Петрова², Г.Ч. Сарыева¹¹ Институт сейсмологии АН Туркменистана, г. Ашхабад, tm.seismology@online.tm² Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, npetrova@gsras.ru

В 2010 г. на территории Туркменистана действовало 20 аналоговых сейсмических станций, цифровая станция «Геокча» системы IRIS и 12 цифровых станций типа Дельта Геон Института сейсмологии АН Туркменистана и управления «Туркменгезлегеофизика» [1]. В конце 2009 г. была закрыта станция Г+ типа Дельта Геон управления «Туркменгезлегеофизика», расположенная в районе Гермаба, т.к. там же с 2004 г. действовала станция Грм типа Дельта Геон Института сейсмологии АН Туркменистана. Станция «Кизил-Арват» типа Дельта Геон в июле 2010 г. была закрыта из-за высокого уровня помех.

Энергетическая представительность регистрации землетрясений практически не изменилась, по сравнению с таковой в 2009 г. На территории Туркмено-Хорасанского района регистрировались без пропусков землетрясения с $K_{3min}=8$ и выше, в Балхано-Каспийском и Центрально-Каракумском районах – с $K_{3min}=8-9$, в Эльбурском и Восточном Туркменистане – с $K_{3min}=9-10$ (табл. 1, рис. 1). Наилучшая энергетическая представительность была обеспечена в центральной части региона благодаря высокой плотности стационарных сейсмических станций, поддерживаемых цифровыми станциями, расположенными в основном на территории Ахалской области.

Таблица 1. Координаты, площади сейсмоактивных районов и региона в целом, значения энергетической представительности регистрации землетрясений K_{3min} и $K_{\gamma min}$ по районам

№	Район	$\varphi_1^\circ - \varphi_2^\circ, N$	$\lambda_1^\circ - \lambda_2^\circ, E$	$S, 10^3 \text{ км}^2$	K_{3min}	$K_{\gamma min}$
1	Балхано-Каспийский	38.5–42.0	51.0–55.5	149	8–9	8
2	Эльбурский	35.0–38.5	51.0–55.5	156	9–10	9
3	Туркмено-Хорасанский	35.0–39.5	55.5–61.0	243	8	8
4	Восточный Туркменистан	35.0–42.0	61.0–67.0	407	9–10	
5	Центрально-Каракумский	39.5–42.0	55.5–61.0	130	8–9	
	Копетдаг	35.0–42.0	51.0–67.0	1082	9–10	9

Кинематические параметры зарегистрированных землетрясений определялись с помощью региональных блочных годографов [2], энергетический класс K_p – по палетке Т.Г. Раутиан [3], магнитуды $MPVA$ – согласно [4], макросейсмические характеристики ощутимых землетрясений – на основе регионального уравнения макросейсмического поля [5]. Правильность и полнота обработки контролировались сопоставлением параметров землетрясений Копетдага из регионального каталога [6] с параметрами этих землетрясений, приведенными в бюллетенях Международного сейсмологического центра ISC [7]. Для перевода в классы K_p магнитуд MS и $MPSP$ по данным Сейсмологического бюллетеня (MOS), M_s и m_b по данным ISC, $ML_{(THR)}$ и $Mn_{(TEN)}$ по данным иранских сейсмологических центров THR и TEN, использовались соотношения из [8, 9]. Для построения карт энергетической представительности K_{3min} применялись методика и программное обеспечение, описанные в [10].

Каталог [6] и карта эпицентров землетрясений Копетдага (рис. 2) содержат сведения о 188 землетрясениях с $K_p \geq 8.6$, зарегистрированных сейсмическими станциями Туркменистана как в границах региона «Копетдаг» (табл. 1), так и за его пределами. На карте (рис. 2) представлены также 16 землетрясений из дополнительного каталога [11] с параметрами по [7, 12, 13], зарегистрированных сейсмическими станциями Туркменистана, но не поддающихся обработке из-за их небольшой энергии ($K_p=8-10$) и дальности. При расчете энергетической представительности

$K_{\gamma min}$ (табл. 1) и характеристик сейсмического режима по районам (табл. 2, рис. 4) расчетные энергетические классы $K_{расч}$ землетрясений из дополнительного каталога [11] определялись из магнитуд по пересчетным соотношениям [8, 9]. Для трех землетрясений из [11], для которых имелись и $K_{расч}$, и энергетические классы по данным среднеазиатского сейсмологического центра NNC, $K_{P(NNC)}$, окончательным считался средний энергетический класс. Сейсмические события, произошедшие вне границ районов Копетдагского региона из табл. 1, в расчетах параметров сейсмического режима (табл. 2) не участвовали. В табл. 2 представлены два варианта параметров сейсмического режима: в числителе – для землетрясений по данным сейсмической службы Туркменистана [6], в знаменателе – по всем имеющимся данным [6, 11].

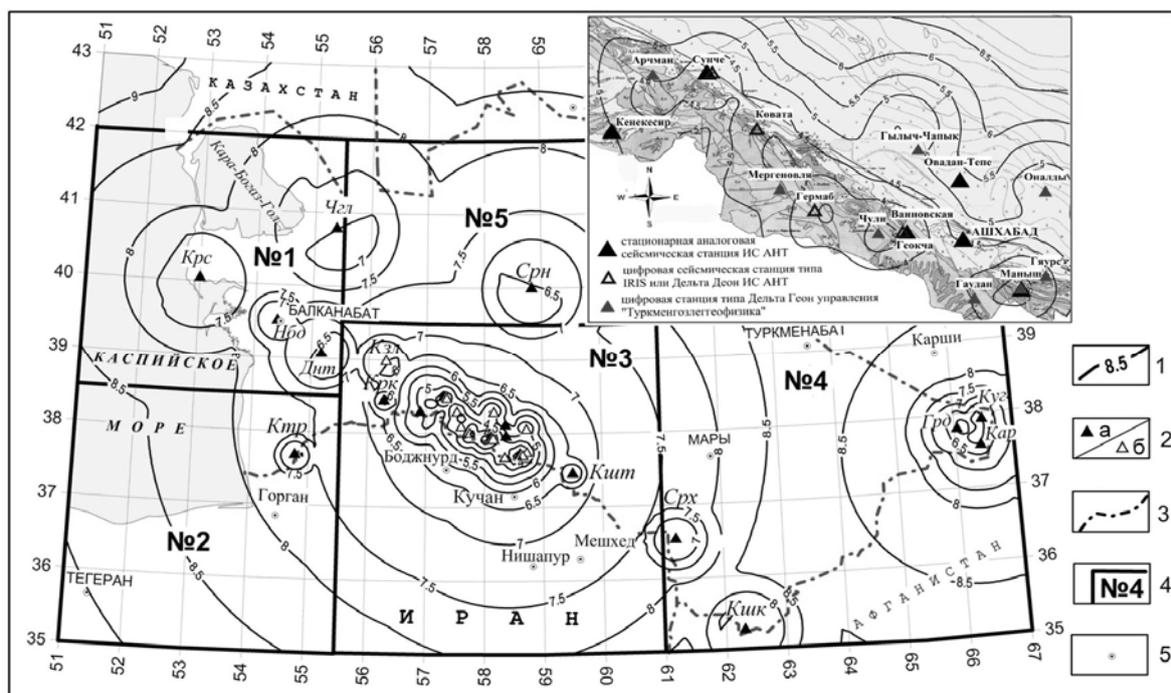


Рис. 1. Карта энергетической представительности землетрясений Копетдага K_{3min} по данным наблюдений в 2009–2010 гг., рассчитанная по методике [10] (на врезке – детализация карты K_{3min} и расположения сейсмических станций для центральной части Копетдага)

1 – изолиния $K_{3 min}$; 2 – сейсмическая станция аналоговая (а) и цифровая (б); 3 – государственная граница; 4 – граница сейсмоактивного района; 5 – город.

Таблица 2. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_p , суммарная сейсмическая энергия ΣE и параметры сейсмического режима A_{10} и γ в сейсмоактивных районах Копетдагского региона в 2010 г.

№	Район	K_p							N_{Σ}	$\Sigma E \cdot 10^{12}$ Дж	γ	A_{10}	ΔK
		8	9	10	11	12	13	14					
1	Балхано-Каспийский	78	27	$\frac{4}{5}$	3	2			$\frac{114}{115}$	$\frac{1.609}{1.614}$	$\frac{0.42}{0.41}$	$\frac{0.059}{0.061}$	8–12
2	Эльбурский	35	$\frac{25}{31}$	$\frac{8}{9}$	2		1	1	$\frac{72}{80}$	$\frac{69.998}{70.006}$	$\frac{0.34}{0.38}$	$\frac{0.051}{0.061}$	9–13
3	Туркмено-Хорасанский	151	61	$\frac{19}{20}$	8	3	1		$\frac{243}{244}$	$\frac{16.867}{16.872}$	$\frac{0.43}{0.43}$	$\frac{0.082}{0.087}$	8–13
4	Восточный Туркменистан	$\frac{6}{10}$	$\frac{8}{12}$	2	4				$\frac{20}{28}$	$\frac{0.408}{0.424}$			
	Копетдаг	$\frac{270}{274}$	$\frac{121}{131}$	$\frac{33}{36}$	17	5	2	1	$\frac{449}{466}$	$\frac{88.882}{88.916}$	$\frac{0.42}{0.42}$	$\frac{0.037}{0.038}$	8–14

Примечание. В числителе указаны параметры по данным сейсмической службы Туркменистана [6], в знаменателе – по всем имеющимся данным [6, 11]; ΔK – диапазон энергетических классов графиков повторяемости для определения γ , A_{10} .

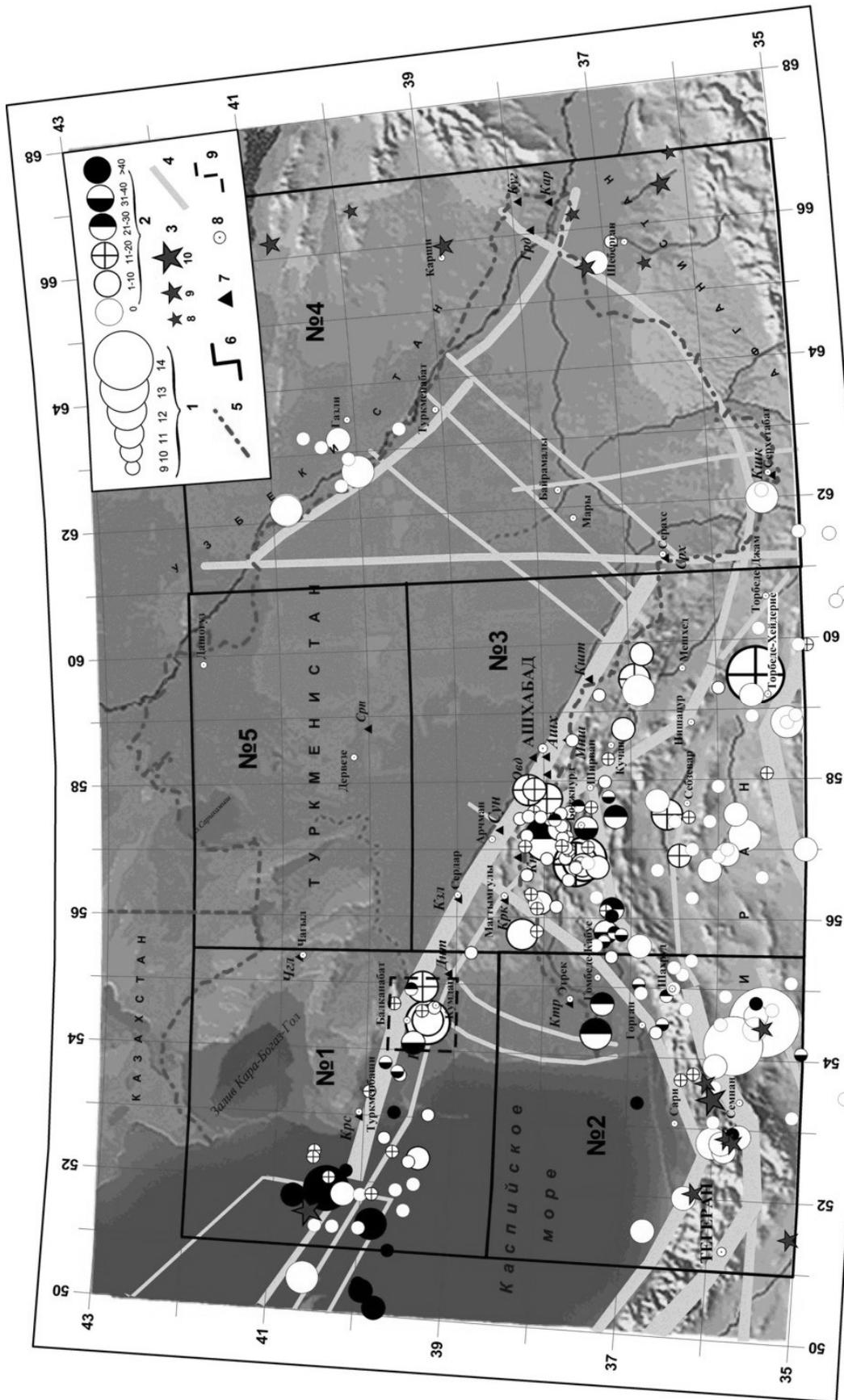


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Копетдага в 2010 г.

1 – энергетический класс K_p землетрясений из каталога [6]; 2 – глубина гипоцентра H , км (0 – глубина не определена); 3 – эпицентры и энергетический класс K_p землетрясений из дополнительного каталога [11]; 4 – сейсмолинеament; 5 – граница Туркменистана; 6 – граница сейсмоактивного района; 7 – сейсмостанция; 8 – город; 9 – граница выборки землетрясений Кумдагского района для пространственно-временного анализа на рис. 6.

Механизмы очагов 57 землетрясений Копетдага, представленные в [14, 15] и на рис. 3, определены совместно сотрудниками Института сейсмологии Туркменистана и Геофизической обсерватории «Борок» (филиал ИФЗ РАН) по знакам первых вступлений P -волн на сейсмических станциях Туркменистана и станций глобальной сети [16]. В [15] приведены механизмы очагов из дополнительного каталога [11]. При решении фокальных механизмов использовались методические приемы, предложенные в [17].

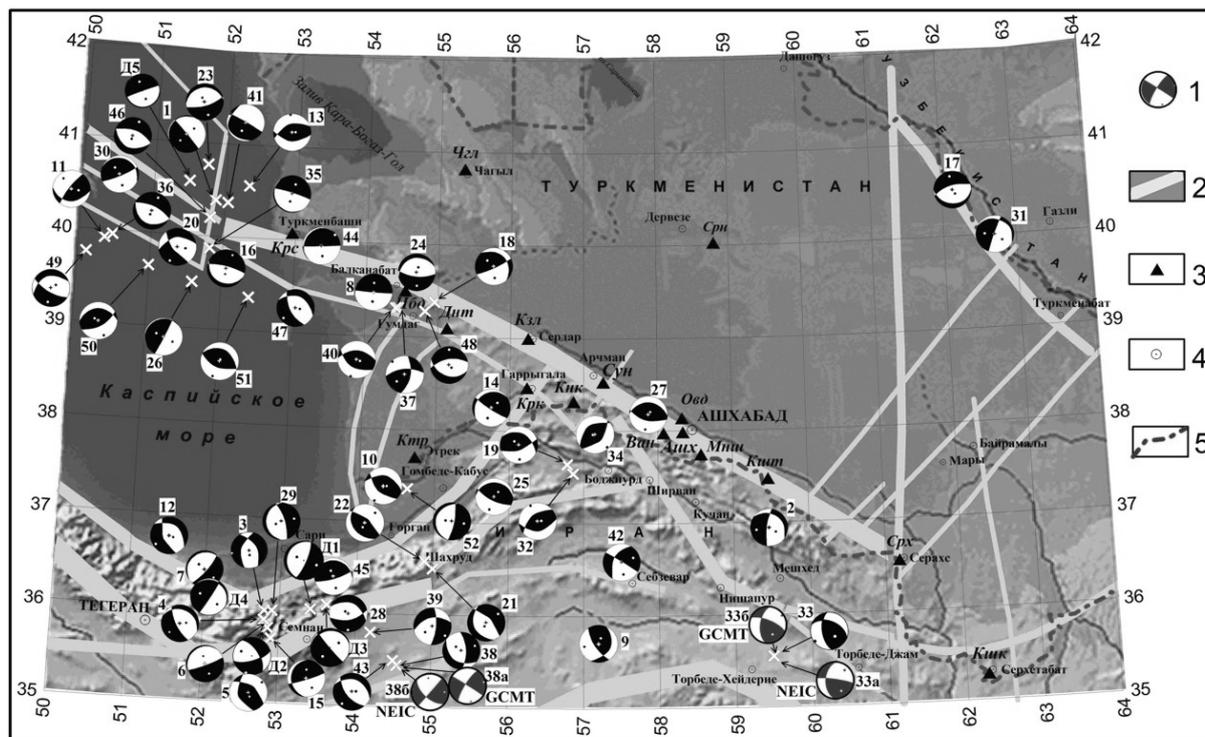


Рис. 3. Механизмы очагов землетрясений Копетдага в 2010 г.

1 – стереограмма механизма очага в проекции нижней полусферы (зачернена область сжатия, номер соответствует номеру механизма очага в [14, 15]); 2 – сейсмолинеамент; 3 – сейсмическая станция; 4 – город; 5 – государственная граница.

Самым крупным сейсмическим событием в регионе в 2010 г. было 7-балльное Кух-Зарское землетрясение с $K_p=13.8$ [18], произошедшее 27 августа в 19^h23^m вблизи юго-восточной границы Эльбурского района, в иранской провинции Семнан. На территории Туркменистана максимальное по энергии землетрясение с $K_p=11.9$ реализовалось в Балхано-Каспийском районе всего через 5 часов после Кух-Зарского, 28 августа в 00^h46^m [6].

Общее число зарегистрированных в 2010 г. в Копетдагском регионе землетрясений, с учетом данных международных служб, осталось почти на том же уровне, что и в 2009 г., с $N_{\Sigma}=191$ [19], хотя выделившаяся сейсмическая энергия значительно возросла ($\Sigma E=88.91 \cdot 10^{12}$ Дж в 2010 г. по сравнению с $\Sigma E=7.67 \cdot 10^{12}$ Дж в 2009 г. [20]). Этот рост объясняется увеличением числа землетрясений с $K_p \geq 12$ ($N=8$ по сравнению с $N=2$ в 2009 г.) и некоторым уменьшением числа более слабых землетрясений. В результате наклон графика повторяемости землетрясений Копетдагского региона (рис. 4 а) понизился с $\gamma=0.54$ в 2009 г. до $\gamma=0.42$ в 2010 г., при незначительном увеличении сейсмической активности.

На территории **Балхано-Каспийского района (№ 1)** выделившаяся в 2010 г. сейсмическая энергия и сейсмическая активность, равные $\Sigma E=1.614 \cdot 10^{12}$ Дж и $A_{10}=0.061$ соответственно, понизились по сравнению с аналогичными параметрами в 2009 г. ($\Sigma E=5.28 \cdot 10^{12}$ Дж и $A_{10}=0.066$) [20], что обусловлено как отсутствием в 2010 г. землетрясений с $K_p > 12$, так и понижением числа зарегистрированных землетрясений с $K_p=8-10$ ($N=110$, по сравнению с $N=150$ в 2009 г.). Судя по графику повторяемости (рис. 4 б), в районе № 1 наблюдался недостаток землетрясений 10-го энергетического класса и избыток событий с $K_p=12$, который компенсировал их недостаток в 2009 г., отмеченный в [20].

Одной из наиболее активных зон в 2010 г. в районе № 1 оставалась Каспийская очаговая зона, охватывающая сейсмолинементы северо-западного простирания в районе Прибалхано-Апшеронского порога, с самыми крупными сейсмическими событиями в районе их пересечения с меридиональным Каспийским разломом. Именно здесь 1 января в 02^h34^m произошло землетрясение с $K_p=11.6$. Глубина $h=47$ км типична для Каспийской очаговой зоны. Механизм очага (№ 1 на рис. 3) представлял собой вертикальную подвижку по плоскости северо-западного простирания с подъемом северного/опусканием южного крыла разрыва ($NP1$), или горизонтальный сдвиг по субмеридиональной плоскости ($NP2$). Предпочтительным представляется движение по нодальной плоскости $NP1$. В течение года в очаговой зоне этого землетрясения произошло два афтершока с $K_p \div 10$ и четыре с $K_p \div 9$ [6]. Один из них, 28 августа в 22^h40^m с $K_p=9.0$ (№ 41 на рис. 3), имел такой же механизм очага, что и главный толчок. В очагах двух других, 6 мая в 12^h04^m с $K_p=10.0$ (№ 23 на рис. 3) и 24 октября в 19^h44^m с $K_p=10.0$ (№ 46 на рис. 3), произошли сбросы по плоскостям субширотного простирания.

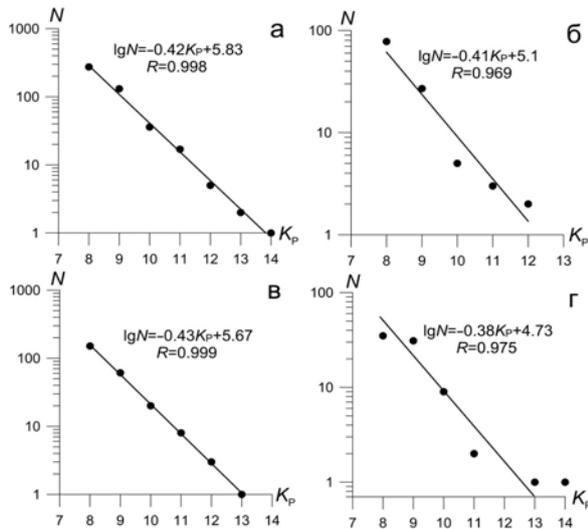


Рис. 4. Графики повторяемости землетрясений Копетдага (а), Балхано-Каспийского (б), Туркмено-Хорасанского (в) и Эльбурского (г) районов

Самое крупное сейсмическое событие в районе № 1 произошло 28 августа в 00^h46^m с $K_p=11.9$, $M_{S(ISC)}=4.0$, $m_b=4.8$, $MPSP_{(MOS)}=5.0$. Эпицентр расположен на равных расстояниях (~23 км) от городов Балканабат и Кумдаг. В г. Балканабат землетрясение ощущалось с интенсивностью $I=3$ балла. Сведений о его проявлениях в Кумдаге нет, т.к. макросейсмическое обследование не проводилось. Землетрясение предварялось форшоком 27 августа в 19^h12^m с $K_p=11.2$, ощущавшимся в г. Балканабат с интенсивностью 2 балла. Судя по более высокой магнитуде по поверхностным волнам $M_{S(ISC)}=4.2$ форшока, можно было бы предположить, что он является главным толчком, но магнитуды по продольным P -волнам $MPSP=4.8$, $m_b=4.5$, а также энергетический класс $K_p=11.2$ этого события ниже аналогичных параметров землетрясения 28 августа, что свидетельствует в пользу события 28 августа в качестве главного толчка, что отмечено в [6].

Пространственно оба землетрясения локализованы вблизи западного окончания 20-километрового разрыва в зоне Прибалхано-Апшеронского разлома, вышедшего на поверхность при Кумдагском землетрясении 14.03.1983 г. с $K_p=13.8$, $MLH=5.7$ [21, 22, 23]. Наличие крупного форшока у землетрясения 28 августа 2010 г., произошедшего за 5.5 часов до главного толчка и отличающегося от него по классу энергии всего на $\Delta K_p=0.7$, характеризует их принадлежность к Кумдагской очаговой зоне с высокой группируемостью землетрясений. Напомним, что Кумдагское землетрясение 14.03.1983 г. с $K_p=13.8$ имело форшок с $K_p=13.0$, произошедший всего за 17.5 минут до главного толчка (рис. 5 а, [23]). Как и при Кумдагских землетрясениях 1983 г., ориентация плоскостей разрыва в очагах землетрясений 2010 г. – субширотная, но знак движения по падению отличается. В очагах главного толчка и большинства афтершоков Кумдагского землетрясения 14.03.1983 г. преобладали сдвиговые подвижки с незначительными компонентами сброса (рис. 5 а, [23]), тогда как в очаге форшока 27 августа 2010 г. произошел правосторонний сдвиг с компонентами взброса северного крыла разрыва, а при главном толчке 28 августа 2010 г. – взброс северного крыла разрыва (рис. 5 б). Как видно из рис. 5, условия горизонтального сжатия северо-западной или меридиональной ориентации в районе Кумдага, наблюдавшиеся в 1983 г., характерны и для очагов землетрясений 2010 г., но горизонтальное растяжение в 1983 г. сменилось в очаге форшока 27 августа в 2010 г. растяжением с наклоном $PL_T=39^\circ$ к горизонту и близвертикальным в очаге главного толчка 28 августа, при неизменной ориентации с юго-запада на северо-восток осей растяжения (рис. 5 б). Разница в механизмах очагов землетрясений 1983 и 2010 гг. в районе Кумдага может объясняться как временными вариациями наклона оси растяжения, так и локальными особенностями напряженного состояния участка Прибалхано-Апшеронского разлома в 20 км к северо-западу от Кумдага.

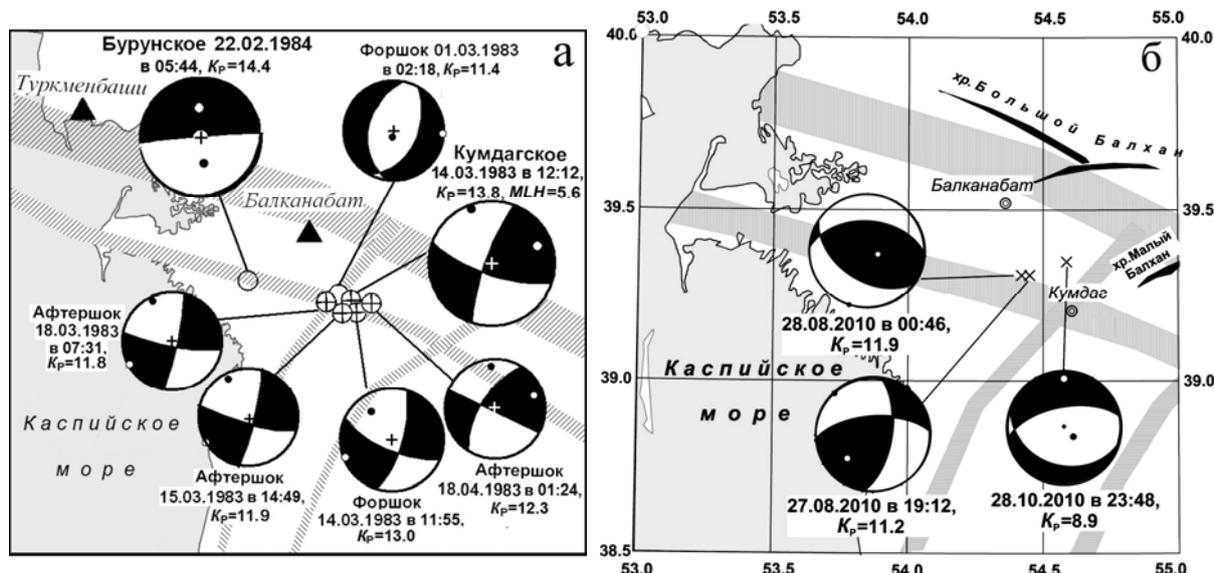


Рис. 5. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений в районе Кумдага: главного толчка, фор- и афтершоков 8-балльного Кумдагского землетрясения 14.03.1983 г. с $K_p=13.8$, $MLH=5.7$ и 8-балльного Бурунского землетрясения 22.02.1984 г. с $K_p=14.4$, $MLH=5.9$ [24] (а); землетрясений 2010 г. в районе Кумдага (б)

Стереогаммы в проекции нижней полусферы, зачернена область сжатия, ось сжатия – черный кружок, ось растяжения – белый кружок.

Пространственно-временное развитие сейсмического процесса в 2010 г. в районе Кумдага ($\varphi=38.9-39.8$ N; $\lambda=54.0-55.2$ E) представлено на рис. 6. Землетрясению 28 августа предшествовало 3-месячное сейсмическое затишье на уровне землетрясений с $K_p \geq 7.6$. Афтершоковая активность землетрясения 28 августа проявилась на уровне слабых землетрясений с $K_p < 8.6$, за исключением события 28 октября 2010 г. в 23^h48^m с $K_p=8.9$ в 15 км к северо-востоку от эпицентров вышеописанных форшока и главного толчка, которое, с учетом ошибки определения координат эпицентра (± 12 км, [6]), может быть отнесено к афтершокам сейсмического события 28 августа. Подвижка в очаге землетрясения 28 октября представляла собой сброс по широтной плоскости в условиях горизонтального растяжения и вертикального сжатия, что характерно для землетрясений на границе опускающейся Южно-Каспийской впадины.

Еще одно значительное сейсмическое событие произошло 6 апреля в 00^h47^m с $K_p=10.7$ в очаговой зоне Балханского землетрясения 06.12.2000 г. с $MS=7.3$ [25]. В очаге землетрясения 6 апреля 2010 г. реализовался взброс по крутой плоскости северо-восточного простирания (NPI), или правосторонний сдвиг с компонентой надвига северного крыла разрыва по пологой плоскости

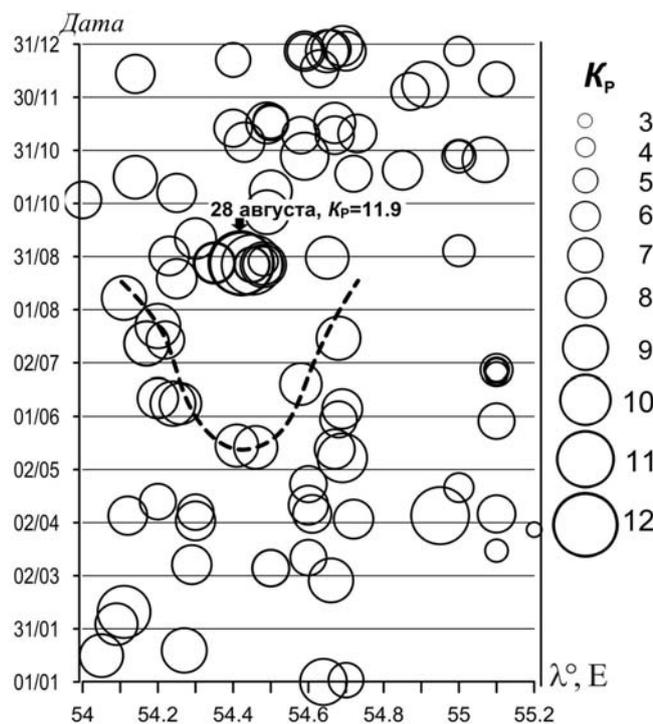


Рис. 6. Пространственно-временное распределение в 2010 гг. эпицентров землетрясений с $K_p \geq 3.0$ в Кумдагском районе (показан пунктирной линией на рис. 2) в проекции на долготу

Пунктирной линией выделена область сейсмического затишья перед землетрясением 28 августа в 00^h46^m с $K_p=11.9$.

северо-западного простирания (*NP2*). Решение для нодальной плоскости *NP2* кажется более реалистичным с тектонической точки зрения, согласно которой на западном участке Копетдаг-Большебалханского разлома, к которому приурочено анализируемое землетрясение, возможны правосторонние сдвиги или надвиги северного крыла. К тому же ориентация, наклон и тип подвижки по плоскости *NP2* близки к параметрам аналогичной северо-западной плоскости в очаге Балханского землетрясения 06.12.2000 г. с $M_S=7.3$, по данным HRVD ([16, 25], рис. 7).

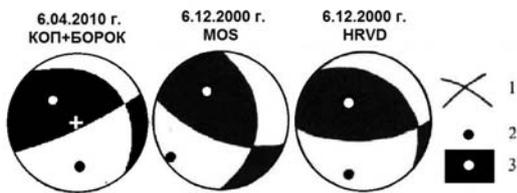


Рис. 7. Стереогаммы механизмов очагов в проекции нижней полусферы землетрясения 06.04.2010 г. в 00^h48^m с $K_p=10.7$ в сравнении с таковыми для Балханского землетрясения 06.12.2000 г. с $M_S=7.3$, по данным MOS и HRVD

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения; зачернены области сжатия.

В Эльбурском районе (№ 2) сейсмическая активность и число землетрясений с $K_p=9-13$ ($A_{10}=0.061$ и $N_2=42$) понизились по сравнению с аналогичными параметрами в 2009 г. ($A_{10}=0.075$, $N_2=57$ [20]), несмотря на значительное увеличение выделившейся сейсмической энергии, связанное с реализацией на южной границе района Кух-Зарского землетрясения 27 августа с $K_p=13.8$ и его крупнейшего афтершока с $K_p=12.8$. Для сравнения, в 2009 г. максимальное землетрясение в районе № 2 имело энергетический класс $K_p=11.8$ [19].

Кух-Зарское землетрясение 27 августа в 19^h23^m с $K_p=13.8$, $M_w=5.8$ произошло в малонаселенной местности на севере Центрального Ирана и ощущалось с интенсивностью 7 баллов по модифицированной шкале Меркалли [26] в ближайших селах, включая Кух-Зар, где оно вызвало значительные разрушения и гибель четырех человек [27]. Данные макросейсмического обследования, проведенного в радиусе 110 км от эпицентра [27], а также сведения об ощутимости этого землетрясения на больших расстояниях, опубликованные на странице DYFI сайта USGS [28], проанализированы в специальной статье настоящего сборника [18].

Сейсмические станции Туркменистана зарегистрировали лишь несколько афтершоков Кух-Зарского землетрясения, гораздо больше их записано иранскими станциями [12]. На основе совместных данных составлен каталог афтершоков Кух-Зарского землетрясения [29], содержащий 58 событий с крупнейшим афтершоком 28 августа в 00^h29^m с $K_p=12.8$ [6]. Параметры афтершока 28 августа в 00^h29^m определены сетью сейсмических станций Туркменистана с большой ошибкой ($\delta=\pm 35$ км), и судя по карте на рис. 2, можно было бы заключить, что это землетрясение не относится к очаговой зоне Кух-Зарского землетрясения. Однако в [18] на основе анализа инструментальных данных международных сейсмологических центров показано, что событие 28 августа в 00^h29^m , без сомнения, является афтершоком Кух-Зарского землетрясения. Для всех событий в [29] приведены энергетические классы, рассчитанные из локальной магнитуды M_n по данным иранского сейсмологического центра ТЕН [12] с помощью соотношения ее со средним по сети сейсмических станций Туркменистана энергетическим классом по шкале Раутиан:

$$K_p = 1.915 M_n + 2.68 \text{ из [9].} \tag{1}$$

Анализ для семи общих событий показал хорошее соответствие между рассчитанными по формуле (1) энергетическими классами $K_{\text{расч}}$ и K_p из каталога землетрясений Копетдага [6], со средним отклонением $\delta K_{\text{расч}} = -0.1$ [18].

Среди других сейсмических событий Эльбурского района самым крупным ($K_p=11.5$) является землетрясение 4 марта в 03^h24^m , локализованное на туркмено-иранской границе, в 50 км к юго-западу от пос. Этрек. Землетрясение не ощущалось на территории Туркменистана. Механизм очага (№ 10 на рис. 3) определен по 73 знакам первых вступлений *P*-волн [14]. В очаге в условиях горизонтального юго-западного сжатия и вертикального растяжения реализовался надвиг (*NP1*) или взброс (*NP2*) плоскости северо-западного–юго-восточного простирания, с незначительными компонентами левого или правого сдвига соответственно (№ 10 на рис. 3). В течение года в радиусе 50 км от эпицентра этого землетрясения туркменскими станциями зарегистрировано 8 толчков в диапазоне энергетических классов $K_p=7-10$, из них два события с $K_p \div 7$ и $K_p \div 8$ произошли до землетрясения, а два с $K_p \div 8$ и один с $K_p=9.7$ – после землетрясения. Землетрясение 15 декабря в 22^h02^m с $K_p=9.7$ произошло в 40 км восточнее эпицентра

землетрясения 4 марта, но с учетом ошибок определения координат обоих толчков (± 31 км и ± 28 км соответственно) и близких глубин ($h=23$ км и 24 км соответственно) их можно отнести к одному очагу. Механизм очага землетрясения 15 декабря (№ 52 на рис. 3) отличается от события 4 марта по ориентации главных компонент поля напряжений, нодальных плоскостей и знаку подвижки – 15 декабря в условиях вертикального сжатия и горизонтального широтного растяжения произошел сброс (горизонтальный сдвиг) западного крыла субмеридионального пологого разрыва ($DP=14^\circ$), или сброс восточного крыла крутого разрыва той же ориентации. Ориентация нодальных плоскостей землетрясения 15 декабря совпадает с субмеридиональной ориентацией Шахманского разлома (рис. 2, 3), и сбросовая подвижка в его очаге может быть связана с общим процессом опускания Южно-Каспийской впадины, тогда как взброс в очаге землетрясения 4 марта по разрыву, ортогональному Шахманскому, может быть отражением преобладающего сдвиго-надвигового типа механизмов очагов в зоне континентальной коллизии между Аравийской и Евразийской плитами, которая простирается от Загроса на юге до Большого Кавказа, Апшеронско-Балханской ступени и Копетдага на севере.

Интенсивным афтершоковым процессом в районе № 2 выделяется умеренное ($K_p=11.2$) землетрясение, произошедшее 20 января 2010 г. в 05^h19^m с между иранскими городами Тегеран и Семнан, в районе смены ориентации разломов Эльбурса с запад-северо-западной на северо-восточную (рис. 2 и 3). В его афтершоковой серии – три землетрясения с $K_p=10$ и пять – с $K_p=9$ [6, 11]. Для большинства землетрясений этой серии определены механизмы очагов, которые отличаются от ожидаемых в этом районе Эльбурса левых сдвигов и надвигов [30, 31] преобладанием сбросовой компоненты движения в очаге. Так, при главном толчке 20 января в 05^h19^m с $K_p=11.2$ (№ 3 на рис. 3) произошел левый сдвиго-сброс по субмеридиональной ($STK=194^\circ$) плоскости, или правый сдвиго-сброс по плоскости северо-западного простирания ($STK=330^\circ$). Через 6.5 минут 20 января в 05^h26^m произошел толчок близкой энергии, $K_p=10.5$, который, учитывая малую паузу после основного толчка, можно считать его продолжением после преодоления некоего препятствия. При второй подвижке в очаге (№ 4 на рис. 3) произошел сброс с компонентой левого сдвига по крутой плоскости юго-восточного простирания, или правый сдвиго-сброс по пологой субширотной плоскости. В очаге афтершока 26 января в 01^h52^m с $K_p=10.0$ (№ 6 на рис. 3) реализовался сброс по крутой плоскости северо-восточного простирания, или горизонтальный сдвиг по плоскости юго-западного простирания ($STK=220^\circ$, $DP=9^\circ$, $SLIP=-119^\circ$). Следующий афтершок произошел 29 марта в 22^h34^m с таким же энергетическим классом $K_p=10.0$. Его механизм очага (№ 15 на рис. 3), в отличие от предыдущих толчков, представлял собой взброс по плоскости северо-западного простирания, или близгоризонтальный сдвиг ($DP=17^\circ$, $SLIP=23^\circ$) по меридиональной плоскости. При афтершоке 27 мая в 04^h02^m с $K_p=9.5$ реализовался горизонтальный сдвиг ($NP1$) или сброс ($NP2$) по меридиональной плоскости (№ 29 на рис. 3). Для афтершока 18 сентября в 19^h56^m с $K_{расч}=9.5$ из дополнительных каталогов [11, 15] механизм очага рассчитан без участия туркменских станций (Д2 на рис. 3) и представлял собой правый сбросо-сдвиг по крутой плоскости северо-восточного простирания, или левый сдвиг с незначительной сбросовой компонентой по плоскости северо-западного простирания.

В целом по Эльбурскому району в 2010 г. отмечается нетипичное преобладание сбросов.

Туркмено-Хорасанский район (№ 3), как и ранее, отличался самой высокой среди сейсмоактивных районов Копетдага сейсмической активностью ($A_{10}=0.087$), которая к тому же повысилась по сравнению с аналогичным показателем за предыдущий год ($A_{10}=0.074$), при почти неизменном наклоне графика повторяемости ($\gamma=0.43$). Значительно возросла выделявшаяся сейсмическая энергия ($\Sigma E=16.9 \cdot 10^{12}$ Дж, по сравнению с $\Sigma E=0.91 \cdot 10^{12}$ Дж в 2009 г. [20]), а также число землетрясений всех энергетических классов.

Самое значительное в районе № 3 сейсмическое событие произошло 30 июля в 13^h50^m с $K_p=13.1$, $M_w=5.5$, в 39 км по [6], или в 7 км по [12], от иранского г. Торбеде-Хейдерие. Землетрясение нанесло серьезный ущерб дюжине сел в районе Торбеде-Хейдерие, ранены, по разным источникам, от 150 до 274 человек [7, 32]. В Ашхабаде землетрясение ощущалось с интенсивностью $I=2$ балла [28]. К сожалению, найти в [7, 12, 23, 28] упоминаний о балльности в ближайших населенных пунктах не удалось, поэтому попробуем оценить ее с помощью усредненного уравнения макросейсмического поля Шебалина:

$$I = 1.5M - 3.5 \lg r + 3.0 \quad [33]. \quad (2)$$

Наиболее надежная глубина по фазе pP определена в ISC [7] – $h_{ISCJB} = 17$ км, $h_{ISC} = 19$ км. При среднем значении $h = 18$ км, которое совпадает с $h_{КОП} = 18$ км [6], и эпицентральной дистанции до г. Торбеде-Хейдерие по данным Иранского сейсмологического центра $\Delta = 7$ км [12], гипоцентральной дистанции $r = 19$ км. Под M в уравнении (2) подразумевается магнитуда MLH [33]. С помощью соотношений магнитуд $M_{SISC} = 5.0$ и $M_{SMOS} = 4.9$ из [7] с MLH для Кавказ-Копетдагского региона [34] получаем $MLH = 5.2$. Подставляя $r = 19$ км и $MLH = 5.2$ в (2), получаем $I = 6-7$ баллов в Торбеде-Хейдерие. Такое же значение, $I_0 = 6-7$ баллов исходя из (2), наблюдалось в эпицентре землетрясения 30 июля в 13^h50^m . При тех же параметрах получаем из (2) интенсивность сотрясений в Ашхабаде $I = 2$ балла, что соответствует средней оценке по четырем откликам, собранным на сайте USGS «Did You Feel It?» [28]. Это подтверждает как правильность выбранных параметров глубины и магнитуды, так и применимость усредненного уравнения Шебалина (2) для территории Северного Ирана между Торбеде-Хейдерие и Ашхабадом.

Решения механизма очага землетрясения 30 июля, определенного тремя агентствами – КОП+ГО БОРОК [14], NEIC и GCMT [16] (№ 33, 33 а и 33 б на рис. 3 соответственно) – в целом совпадают. В очаге произошел левый взбросо-сдвиг по запад-северо-западной плоскости, или правый взбросо-сдвиг по меридиональной плоскости. Эти решения согласуются с представлением о преобладании сдвиговых и взбросовых подвижек в очагах землетрясений Северного Ирана, отражающих процесс сокращения земной коры Туркмено-Хорасанских гор в результате сближения Аравийской и Евразийской плит.

Землетрясение 30 июля не имело афтершоков, по крайней мере, в радиусе 25 км от эпицентра. Исключение составляет сейсмическое событие 20 декабря в 16^h56^m с $K_p = 9.6$, которое вряд ли можно отнести к афтершокам из-за длительной паузы после основного толчка и отсутствия других афтершоков. Данный вывод подтверждается выборкой из бюллетеня Иранского сейсмологического центра [12], которая не добавила новых афтершоков к каталогу [6]. Три сейсмических события с $K_p \div 9$ и одно с $K_p \div 11$, локализованные в 50–70 км к западу и юго-западу от эпицентра землетрясения 30 июля (рис. 2), видимо, представляют самостоятельную группу, состоящую из основного толчка 12 апреля в 11^h56^m с $K_p = 10.6$, двух его форшоков, 21 февраля и 12 апреля, и афтершока 24 апреля.

На территории Туркменистана в районе № 3 самое крупное землетрясение с $K_p = 11.5$ произошло 19 марта в 01^h52^m в 54 км юго-западнее г. Магтымгулы (бывшего г. Кара-Кала). В очаге реализовался левый сдвиг по пологой плоскости юго-западного простирания, или взброс по плоскости северо-восточного простирания (№ 14 на рис. 3).

Самая высокая сейсмическая активность, захватывающая приграничные территории Туркменистана и Ирана, наблюдалась южнее места сочленения Гермабского и Главного Копетдагского (Копетдаг-Большебалханского) разломов, западнее которого наблюдается смена ориентации разломов, оперяющих Главный Копетдагский разлом, с северо-западной на северо-восточную (рис. 8 а). В течение 2010 г. здесь реализовалась серия землетрясений, включающая три события с $K_p \div 12$, два – с $K_p \div 11$, пять – с $K_p \div 10$ и множество более слабых (рис. 8 а, б).

Начало серии из пяти землетрясений с $K_p = 11 \div 12$ в 2010 г. положил толчок 19 апреля в 03^h31^m с $K_p = 11.9$, в очаге которого реализовался взброс или надвиг по субширотной плоскости, с компонентами левого или правого сдвига соответственно (рис. 8 а, № 19 на рис. 3). Как видно из рис. 8 а, в районе очага присутствует активный разлом широтной ориентации. Следующий толчок, 25 мая в 13^h03^m с $K_p = 11.3$, произошел в 113 км к северо-западу от эпицентра землетрясения 19 апреля, на территории Туркменистана. Если соединить отрезком прямой оба эпицентра, то вдоль этой линии в дальнейшем наблюдалась самая высокая сейсмическая активность, с отклонением эпицентров землетрясений с $K_p = 11 \div 12$ от этой прямой менее чем на 15 км (рис. 8 а). Эпицентры более слабых землетрясений выстроились на рассматриваемой территории в цепочки северо-западной и северо-восточной ориентации, в большинстве совпадающей с ориентацией близлежащих разломов.

В очаге землетрясения 25 мая произошел взброс южного крыла субширотного разрыва ($NP1$), или надвиг северного крыла по пологой широтной плоскости. С тектонической точки зрения предпочтительным представляется решение для нодальной плоскости $NP1$, т.к. движение по плоскости $NP2$ означает надвиг Предкопетдагского прогиба на Копетдаг, что представить трудно. Землетрясение 25 мая ощущалось в ближайших населенных пунктах: Гёкдепе (10 км), Гермаб (22 км) 3–4 балла, Бахарлы (40 км), Ашхабад (55 км) 3 балла. Землетрясение

имело ряд афтершоков, самый крупный из которых, 30 мая в 08^h48^m с $K_p=9.8$, также ощущался в пос. Гермаб (16 км) с интенсивностью 3 балла и в г. Ашхабад (50 км) – 2 балла.

23 июля в 00^h56^m вблизи эпицентра события 19 апреля с $K_p=11.9$ произошел второй толчок такой же энергии, $K_p=12.0$. В его очаге реализовался надвиг по широтной плоскости с компонентами правого сдвига, или взброс по плоскости юго-западного простирания с компонентами левого сдвига. Простирание обеих нодальных плоскостей близко к ориентации ближайшего сейсмолинеамента (рис. 8 а).

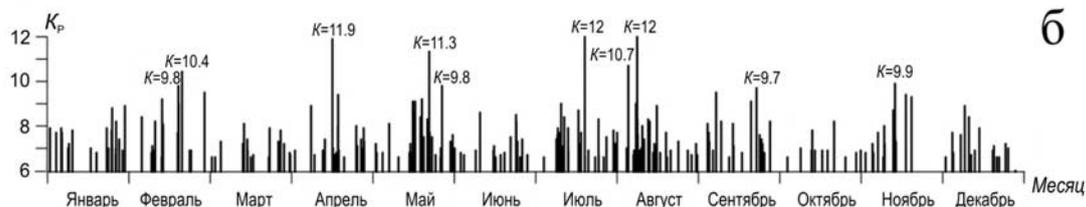
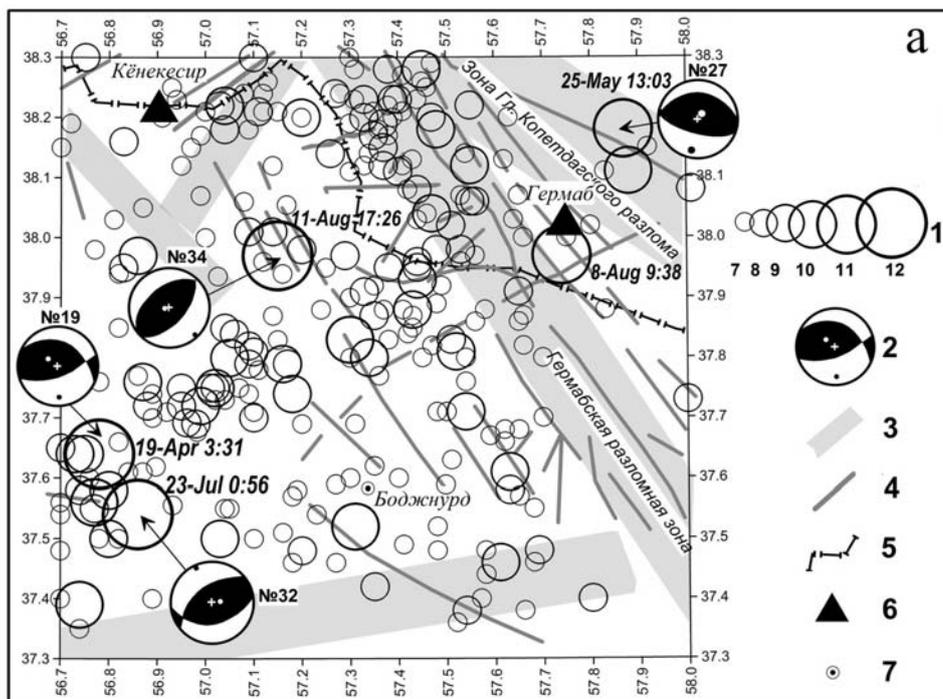


Рис. 8. Сейсмичность в пространстве (а) и во времени (б) в районе смены ориентации разломов, оперяющих Главный Копетдагский разлом

1 – энергетический класс K_p землетрясений; 2 – стереограммы механизмов очагов в проекции нижней полусферы, зачернена область сжатия, номер соответствует номеру в [14]; 3 – сейсмолинеамент; 4 – активные разломы согласно [35]; 5 – туркмено-иранская граница; 6 – сейсмическая станция Туркменистана; 7 – город.

8 августа в 09^h38^m в районе Гермаба реализовалось землетрясение с $K_p=10.7$, а через три дня в 50 км к западу – землетрясение 11 августа в 17^h26^m с $K_p=12$. Механизм очага землетрясения 8 августа определить не удалось, а в очаге землетрясения 11 августа произошел взброс или надвиг по плоскости северо-восточного (юго-западного) простирания. Хотя простирание плоскости разрыва ортогонально разломам северо-западного простирания, к которым приурочен эпицентр этого землетрясения, оно совпадает с северо-восточной ориентацией области максимальной плотности эпицентров землетрясений, включая толчки с $K_p=11\div 12$, отмеченной нами ранее. Возможно, здесь имеется разлом северо-восточной ориентации, не отмеченный на карте Берберяна [35], или разлом на рис. 8 а подобной ориентации, проходящий южнее Гермаба, надо перенести на 25 км на запад.

В Восточном Туркменистане (№ 4) число зарегистрированных сейсмическими станциями Туркменистана и обработанных землетрясений с $K_p \geq 8$, как и выделившаяся в 2010 г. сейсмическая энергия ($N_{\Sigma}=20$, $\Sigma E=0.41 \cdot 10^{12}$ Дж), остались примерно на уровне характеристик

в 2008 и 2009 гг. [20]. При этом число землетрясений с $K_p \geq 10$, 11 существенно понизилось, а число более слабых толчков с $K_p \geq 8$, 9, наоборот, возросло.

Как обычно, наибольшее число землетрясений зарегистрировано в районе Газли. Среди них – два землетрясения с $K_p \geq 11$. В очаге первого из них, 4 апреля в $10^{\text{h}}50^{\text{m}}$ с $K_p=10.6$, произошел сброс по пологой субширотной или крутой плоскости, ориентированной с северо-запада на юго-восток (№ 17 на рис. 3). При втором толчке, 9 июня в $20^{\text{h}}53^{\text{m}}$ с $K_p=10.6$, реализовался сброс по крутой субмеридиональной или пологой субширотной плоскости.

В районе г. Серхетабад 29 сентября в $17^{\text{h}}22^{\text{m}}$ произошло землетрясение с $K_p=11.4$, которое ощущалось в Серхетабаде (32 км) с интенсивностью $I=3$ балла.

По Копетдагу в целом следует отметить заметное увеличение выделившейся сейсмической энергии, начавшееся еще в 2009 г., после ее спада в течение трех предыдущих лет, и продолжающееся снижение общего числа зарегистрированных землетрясений с $K_p \geq 7.6$. Рост сейсмической энергии произошел за счет сильных землетрясений с $K_p \geq 13$, 14 на южных границах региона, тогда как сейсмическая активность и выделившаяся сейсмическая энергия на территории Туркменистана все еще оставались низкими. Обращает на себя внимание нетипичное для Эльбурского района преобладание сбросовых подвижек, а также синхронное возрастание выделившейся сейсмической энергии в районах № 1, 2, 3 в июле-августе 2010 г. (рис. 9). Отметим, что максимум энергии в Туркмено-Хорасанском районе, приходящийся на июль, создан землетрясением 30 июля 2010 г. с $K_p \geq 13$, поэтому можно считать, что максимальная энергия выделилась в районах № 1, 2, 3 синхронно в течение месяца, с 30 июля по 30 августа.

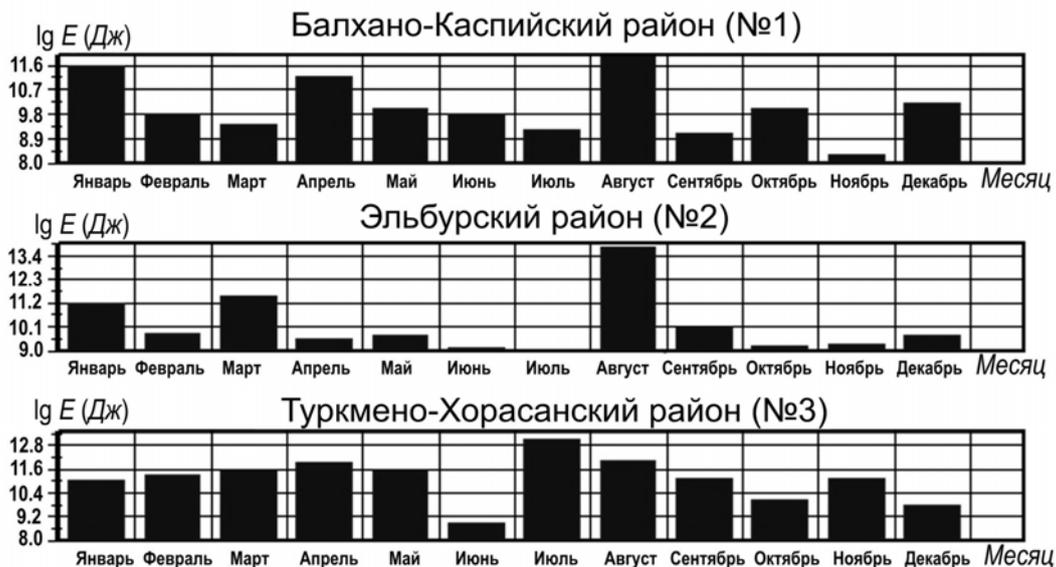


Рис. 9. Темпы выделения в 2010 г. сейсмической энергии в сейсмоактивных районах Копетдагского региона

Л и т е р а т у р а

1. Сарыева Г.Ч., Петрова Н.В., Безменова Л.В. (сост.). Сейсмические станции Копетдага и их параметры в 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
2. Рахимов А.Р., Славина Л.Б. Региональный годограф Копетдагской сейсмической зоны // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. – 1984. – № 3. – С. 31–38.
3. 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.
4. 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.
5. Голинский Г.Л. Уравнения макросейсмического поля землетрясений Туркмении // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. – 1977. – № 1. – С. 69–74.

6. 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).
7. International Seismological Centre, On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
8. Петрова Н.В. Соотношения между оценками величины землетрясений Копетдага по данным различных сейсмологических центров // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 409–417.
9. Петрова Н.В. Магнитуды в международной сейсмологической практике и их связь с энергетическим классом по сети сейсмических станций Туркменистана // Материалы Международной конференции «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху великого возрождения». – Ашхабад: ЫЛЫМ, 2010. – С. 83–86.
10. Петрова Н.В., Абасеев С.С., Сарыева Г.Ч. Методика оценки K_{\min} при регистрации землетрясений цифровыми и аналоговыми станциями Туркменистана // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 458–467.
11. Петрова Н.В., Артёмова Е.В., Безменова Л.В. (отв. сост.). Дополнительный список землетрясений, не вошедших в основной каталог землетрясений Копетдага за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
12. Iranian Seismological Centre. Online Databank. – URL: <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>.
13. Джанузакон К.Д. (отв. сост. по региону), Шукурова Р. (сост. по региону), Соколова Н.П. (Кыргызстан), Гессель М.О. (Казахстан), Тулаганова М.Т. (Узбекистан); Молдобекова С., Афонина Л.Р., Неверова Н.П., Бектурганова Б.Б., Содикова К.И., Кучкаров К.И., Артёмова Е.В. (сост.). Каталог землетрясений Центральной Азии за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
14. 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).
15. Петров В.А. (отв. сост.). Дополнительный каталог механизмов очагов землетрясений Копетдага за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
16. Bulletin of the International Seismological Centre / ISC Bulletin / Focal mechanisms. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/>.
17. Мострюков А.О., Петров В.А. Каталог механизмов очагов землетрясений, 1964–1990 // Материалы Мирового центра данных. – М., 1994. – 87 с.
18. Петрова Н.В. Кух-Зарское землетрясение 27 августа 2010 г. с $K_p=13.8$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Эльбурский район Копетдага). (См. раздел III (Сильные и ощутимые землетрясения) в наст. сб.).
19. Сарыева Г.Ч. (отв. сост.), Тачов Б., Халлаева А.Т., Клочков А.В., Дурасова И.А., Клычёва Э.Р., Эсенова А., Петрова Н.В., Мустафаев Н.С., Артёмова Е.В. (сост.). Каталог землетрясений Копетдага за 2009 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – (На CD).
20. Безменова Л.В., Петрова Н.В., Сарыева Г.Ч. Копетдаг // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 97–107.
21. Голинский Г.Л., Аннаорова Т.А., Рахимов А.Р. Землетрясения Копетдага // Землетрясения в СССР в 1983 году. – М.: Наука, 1986. – С. 38–45.
22. Борисов В.А., Рогожин Е.П. Кумдагское землетрясение 14 марта 1983 года: материалы геологического изучения // М.: ДАН СССР. – 1984. – 224. – № 4. – С. 157–161.
23. Аннаорова Т.А., Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О., Петрова Н.В. Изучение очаговых зон сильных землетрясений в Западной Туркмении // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. – 1989. – № 3. – С. 72–78.
24. Аннаорова Т.А., Голинский Г.Л., Рахимов А.Р., Смирнова Н.П. Землетрясения Копетдага // Землетрясения в СССР в 1984 году. – М.: Наука, 1987. – С. 44–51.
25. Гаипов Б.Н., Петрова Н.В., Голинский Г.Л., Безменова Л.В., Рахимов А.Р. Балханское землетрясение 6 декабря 2000 г. с $M_S=7.3$, $I_0=8-9$ (Копетдаг) // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 306–320.
26. Гир Дж., Шах Х. Модифицированная шкала Меркалли // Зыбкая твердь. – М.: Мир, 1988. – С. 105–108.
27. Shahvar M. and Zaré M. The 27 August 2010 M_w 5.7 Kuh-Zar earthquake (Iran): field investigation and strong-motion evidence // Natural Hazards. – 2013. – 66. – N 2. – P. 689–706.

-
28. **United States Geological Survey (USGS)**. Latest Earthquakes. M5.8 – northern Iran. – URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000hjuq#dyfi>.
 29. **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).
 30. **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**. – P. 559–562.
 31. **Jackson J., Priestley K., Allen M. and Berberian M.** Active tectonics of the South Caspian Basin // *Geophys. J. Int.* – 2002. – **148**. – P. 214–245.
 32. **Wikipedia, The Free Encyclopedia**. – URL: <https://en.wikipedia.org/>.
 33. **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.
 34. **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.
 35. **Berberian M.** Historical Seismicity (pre 1900) Map of Iran. Scale 1:5000000 // Geological Survey of Iran, Tectonic-Seismotectonic Research Section.– 1977.