

КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКИЙ РЕГИОН

Б.Г. Пустовитенко, В.А. Свидлова, В.С. Князева, М.Н. Бондарь

*Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского»,
г. Симферополь, Россия, seismosilver@mail.ru, bpustovitenko@mail.ru*

Аннотация. В 2013 г. в Крыму зарегистрировано 64 местных землетрясения в диапазоне энергетических классов $K_{T1}=4.7-10.1$. Общее количество выделенной сейсмической энергии уменьшилось на два порядка по сравнению с энергией в 2012 году. Для трех землетрясений: 1 мая ($M_{w_{per}}=3.8$), 15 октября ($M_{w_{per}}=3.7$) и 9 декабря ($M_{w_{per}}=3.5$) получено решение механизма очага. Землетрясение 1 мая произошло в восточной части региона под действием горизонтальных сил растяжения. Два других землетрясения возникли в центральной зоне региона в обстановке горизонтальных сил сжатия. Землетрясение 15 октября ощущалось на побережье Крыма с интенсивностью до 4 баллов. Рассмотрены параметры сейсмического режима за 2013 г. и предшествующие 5 лет: угловой коэффициент графика повторяемости и уровень активности A_{10} . Наиболее высокий уровень сейсмической активности $A_{10}=0.4$ за 2013 г. относится к центральной части региона – к очаговой зоне оцутимого землетрясения 15 октября. В Керченско-Анапской группе очагов уровень A_{10} не изменился по сравнению с таковым в 2012 году. Общий вклад от землетрясений 2013 г. в тектоническую деформацию среды был незначительным, как и в предыдущем 2012 году. Максимальная скорость деформации $V\varepsilon=1.0\cdot 10^{-9}$ год⁻¹ связана с оцутимым землетрясением 15 октября и серией толчков 9 декабря.

Ключевые слова: сейсмичность, представительность, интенсивность, механизм очага, сейсмическая активность, тектоническая деформация среды, скорость деформации.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.03

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А., Князева В.С., Бондарь М.Н. Крымско-черноморский регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 44–55. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.03

Система наблюдений. В 2013 г. мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе в рамках границ территории, установленных в 1983 г. [1, с. 3–7], осуществлялся семью стационарными цифровыми сейсмическими станциями Крыма (рис. 1): «Симферополь» (SIM), «Севастополь» (SEV), «Ялта» (YAL), «Алушта» (ALU), «Феодосия» (FEO), «Судак» (SUDU), «Керчь» (KERU) и открытым в 2012 г. пунктом «Тарханкут» (TARU) [2]. Общие сведения о станциях сети и параметрах цифровой регистрирующей аппаратуры представлены в Приложении к наст. сб. [3] на CD.

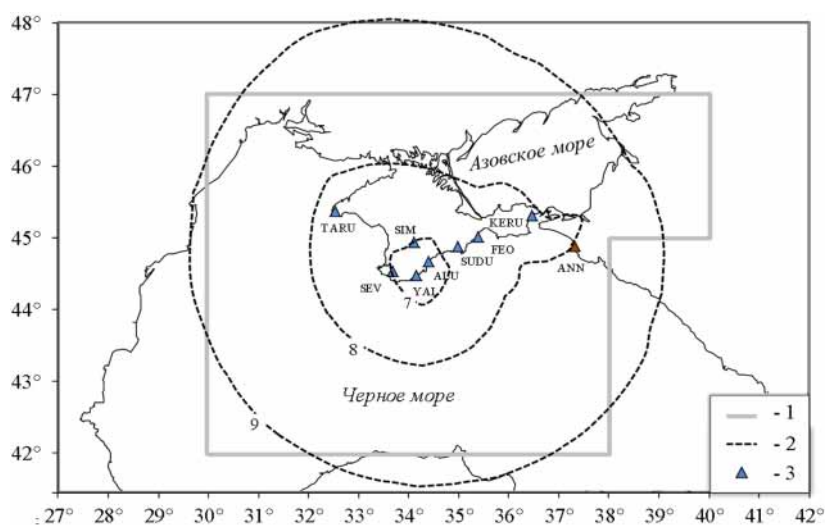


Рис. 1. Карта энергетической представительности K_{min} землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г.

1 – граница региона по регионализации 1983 г. [1]; 2 – изолиния K_{min} ; 3 – сейсмическая станция.

Энергетическая представительность землетрясений K_{\min} по наблюдениям действовавшей в 2013 г. сети (рис. 1), по сравнению с таковой в 2012 г., практически не изменилась. Для всего региона по-прежнему представительными являются землетрясения с $K_{\min}=9$, а с $K_{\min}=7$ только для ограниченной территории вблизи Южного берега Крыма.

Методика сводной обработки местных землетрясений Крыма подробно описана в [4–6]. При обработке землетрясений из районов, приграничных с Северным Кавказом, помимо станций Крымской сети используются также данные станций ФИЦ ЕГС РАН, входящих в сеть Северного Кавказа [7], особенно ежедневные сводки станции «Анапа» (ANN). Первичная интерпретация полученных цифровых сейсмических записей и их сохранение выполняются по программному комплексу WSG [8].

В региональный каталог за 2013 г. [9] включены основные параметры 64 землетрясений Крымско-Черноморского региона. Для 12 событий региона получены спектральные и динамические параметры их очагов [10], для трех – рассчитан механизм очагов [11].

Классификация землетрясений в каталоге выполнена по энергетическим классам K_{Π} [12] для всех землетрясений, а также по локальным магнитудам ML_{wsg} [8] для восьми толчков и по моментным магнитудам [13] Mw_{per} – для 12. Моментные магнитуды Mw_{per} приведены из работы [10]. Диапазон энергетических классов равен $K_{\Pi}=4.7–10.1$, диапазон моментных магнитуд – $Mw_{per}=2.0–3.8$, локальных магнитуд $ML_{wsg}=2.6–3.3$.

В 2013 г. в регионе было два ощутимых землетрясения: 11 марта в 04^h57^m в районе г. Анапа с $I=2$ балла ($K_{\Pi}=9.8$, $Mw_{per}=3.5$, $ML_{wsg}=3.5$), 15 октября в 03^h35^m – Южнобережное, интенсивность сотрясений которого достигала $I=4$ балла по шкале MSK-64 [14] ($K_{\Pi}=10.1$, $Mw_{per}=3.7$, $ML_{wsg}=3.3$).

Сейсмичность региона. Пространственное расположение эпицентров во многом традиционно: наибольшая плотность их просматривается в центральной части региона – в Ялтинском (№ 2) и Алуштинском (№ 3) районах, значительное число очагов отмечено в Керченско-Анапском районе (№ 5) (рис. 2). В основном эпицентры землетрясений сосредоточены в пределах морской акватории. Глубина большинства (92.2 %) землетрясений не превышает преобладающую глубину для региона $h=20–25$ км с ошибкой в определении глубин $\delta h \leq 5$ км [5].

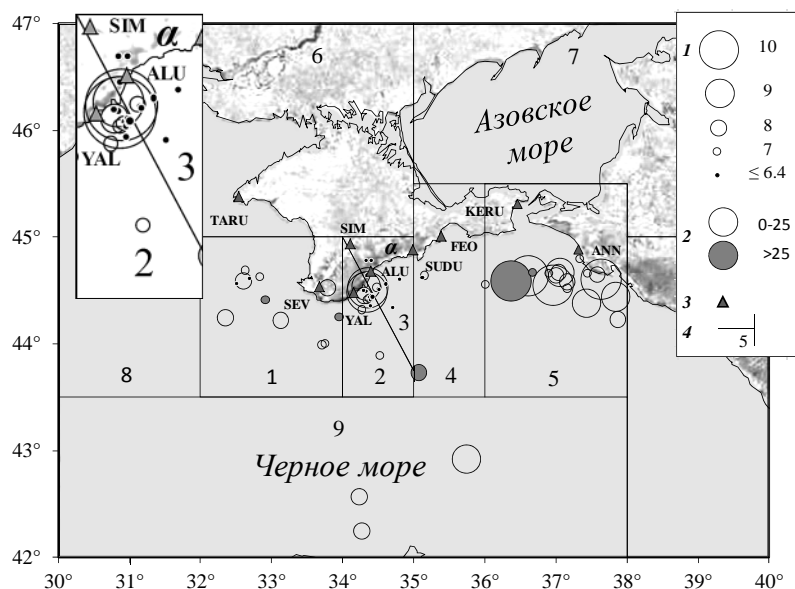


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2013 г.

1 – энергетический класс K_{Π} ; 2 – глубина гипоцентра h , км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница района.

В табл. 1 приведено распределение основных параметров сейсмичности Крымско-Черноморского региона в 2013 г. в сравнении с соответствующими параметрами за предыдущий десятилетний период (2003–2012 гг.).

Из табл. 1 следует, что количество выделенной сейсмической энергии в регионе существенно изменяется со временем и в 2013 г. отмечено заметное снижение уровня сейсмической активности. Количество выделенной годовой сейсмической энергии, равное $\Sigma E=5.29 \cdot 10^{10}$ Дж, уменьшилось более чем на два порядка относительно таковой в 2012 г. – $\Sigma E=1.288 \cdot 10^{12}$ Дж [2].

Таблица 1. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_{II} и суммарная сейсмическая энергия ΣE Крыма за 2003–2013 гг.

Год	K_{II}										N_{Σ}	$\Sigma E,$ <i>Дж</i>
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
2003 [15]	1	11	16	11	15	5	2	1			62	$4.629 \cdot 10^{10}$
2004 [16]		3	16	12	9	7	2	1			50	$5.7202 \cdot 10^{10}$
2005 [17]		1	7	7	7	3	2		1		28	$5.1913 \cdot 10^{11}$
2006 [18]	1	2	8	15	6	8	1	1			42	$2.1534 \cdot 10^{11}$
2007 [19]		2	7	16	11	7	4		1		48	$6.8275 \cdot 10^{11}$
2008 [20]		2	11	16	15	11	5			1	61	$5.0674 \cdot 10^{12}$
2009 [21]		17	60	43	26	8	5	2			161	$3.4884 \cdot 10^{11}$
2010 [22]		6	18	32	22	10	3				91	$3.2684 \cdot 10^{10}$
2011 [23]		11	24	23	20	7	5	2			92	$1.4445 \cdot 10^{11}$
2012 [2]		3	6	14	16	9	3		1		53	$1.2881 \cdot 10^{12}$
Сумма	2	58	173	189	147	75	32	7	3	1	688	$8.402 \cdot 10^{12}$
Среднее	0.2	5.8	17.3	18.9	14.7	7.5	3.2	0.7	0.3	0.1	68.8	$8.402 \cdot 10^{11}$
2013 [9]		8	14	18	13	5	6				64	$5.290 \cdot 10^{10}$

В 2013 г. общее число зарегистрированных землетрясений ($N_{\Sigma}=64$) близко к среднему значению $N_{\Sigma}=68.8$, а количество суммарной сейсмической энергии, равное $\Sigma E \sim 5.3 \cdot 10^{10}$ Дж, примерно в 16 раз меньше среднего $\Sigma E \sim 8.4 \cdot 10^{11}$ Дж (табл. 1).

Изменение по годам числа землетрясений N и логарифма суммарной сейсмической энергии $\lg E$ в регионе за период с 2003 по 2013 г. показано на рис. 3.

Рассмотрим особенности сейсмичности региона по отдельным районам. Распределение в 2013 г. числа землетрясений по районам и энергетическим классам, а также сейсмической энергии по районам представлено в табл. 2. Для сравнения с 2013 г. приведены также суммарные данные за предыдущий 2012 г.

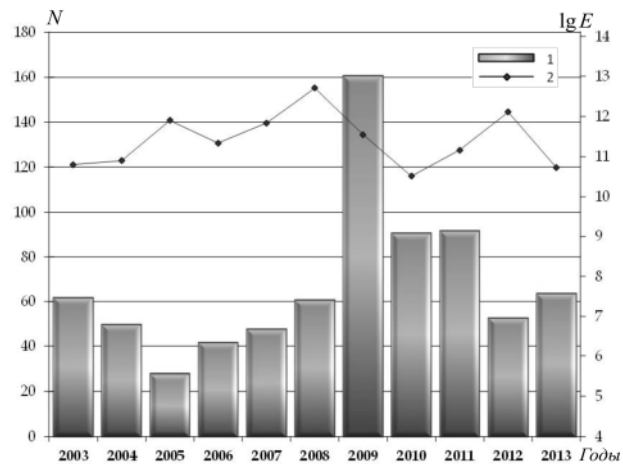


Рис. 3. График распределения числа землетрясений N (1) и логарифма выделившейся энергии $\lg E$ (2) в регионе с 2003 по 2013 гг.

Таблица 2. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_{II} и суммарная сейсмическая энергия ΣE по районам за 2013 г.

№	Район	K_{II}										N_{Σ}	$\Sigma E,$ <i>Дж</i>
		5	6	7	8	9	10	11	12				
1	Севастопольский		2	6	4							12	$0.413 \cdot 10^9$
2	Ялтинский	5	5	4	1	1	2					18	$2.004 \cdot 10^{10}$
3	Алуштинский	3	6	1								10	$0.900 \cdot 10^7$
4	Судакско-Феодосийский		1	1	1							3	$0.522 \cdot 10^8$
5	Керченско-Анапский			6	5	3	4					18	$3.071 \cdot 10^{10}$
6	Степной Крым											0	0
7	Азово-Кубанский											0	0
8	Северо-Западный											0	0
9	Черноморская впадина				2	1						3	$1.675 \cdot 10^9$
	Всего в 2013 г.	8	14	18	13	5	6					64	$5.290 \cdot 10^{10}$
	Всего в 2012 г.	3	6	14	16	10	3		1			53	$1.288 \cdot 10^{12}$

В Севастопольском районе (№ 1) зарегистрировано 12 землетрясений с $K_{II}=5.7-8.2$. Одно из них, с $K_{II}=7.5$, произошло в верхней части ($h=10$ км) земной коры материковой части Крыма в 8 км от станции «Севастополь». Эпицентры всех остальных землетрясений были расположены в акватории Чёрного моря на расстояниях 39–111 км от станции при глубинах $h=5-32$ км.

В Ялтинском районе (№ 2) зарегистрировано 18 землетрясений с $K_{II}=4.8-10.1$. Интересен ход сейсмического процесса в течение года. Восемь месяцев наблюдалось затишье в районе, затем в сентябре отмечены три толчка, и в октябре произошло самое примечательное событие этого года – дуплет землетрясений в течение двух минут. Первое землетрясение максимального класса $K_{II}=10.1$ с глубиной $h=7$ км реализовалось 15 октября в 03^h35^m и ощущалось, как указано выше, на Южном берегу Крыма (см. рис. 5). Его эпицентр ($\varphi=44.53^\circ N$, $\lambda=34.35^\circ E$) находился вблизи побережья, южнее мыса Аю-Даг. Повторный толчок через 2^m, энергетического класса $K_{II}=9.0$ [9], имел практически такие же координаты гипоцентра, как у главного толчка. Энергетическая ступень между ними, равная $\Delta K_a=1.1$, невелика.

9 декабря зарегистрирована группа из семи землетрясений [9] в диапазоне $K_{II}=9.8-4.8$ с координатами эпицентров, близкими к координатам эпицентра ощутимого толчка 15 октября в 03^h35^m (табл. 3).

Таблица 3. Список группирующихся землетрясений в декабре 2013 г. (район № 2)

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Гипоцентр			K_{II}	№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Гипоцентр			K_{II}
			φ°, N	λ°, E	h , км					φ°, N	λ°, E	h , км	
1	09.12	01 05 00.2	44.49	34.34	17	5	09.12	01 07 23.4	44.45	34.42	12	5.0	
2	09.12	01 05 33.7	44.49	34.34	17	6	09.12	04 30 48.4	44.43	34.41	11	5.1	
3	09.12	01 06 44.2	44.44	34.42	12	7	09.12	04 31 09.3	44.45	34.41	11	5.7	
4	09.12	01 07 12.5	44.45	34.42	12								

Первое (главное) событие в группе с $K_{II}=9.8$ произошло в 01^h05^m00.2^s, последующий за ним афтершок с $K_{II}=5.0$ возник через 33.5^s, а последний с $K_{II}=5.7$ – через 03^h26^m09.1^s. Следует отметить очень большую в данном случае энергетическую ступень $\Delta K_{TP}=4.1$ между основным толчком и наиболее сильным афтершоком в отличие от других группирующихся землетрясений центральной зоны региона [5, 24–26].

Для двух землетрясений из Ялтинского района: ощутимого 15 октября в 03^h35^m и 9 декабря в 01^h05^m получены решения механизма очага [11] в рамках дислокационной теории [27] по знакам первых вступлений продольных P -волн по методике [28].

Оба землетрясения произошли в обстановке горизонтальных сил сжатия, ориентированных близширотно. Тип подвижки в очагах – взброс (рис. 4 а, б).

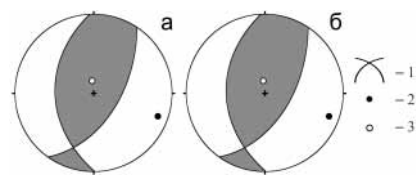


Рис. 4. Диаграммы механизмов очагов землетрясений 2013 г. в проекции нижней полусферы: 15 октября в 03^h35^m42.3^s (а) и 9 декабря в 01^h05^m00.2^s (б)

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

Механизмы очагов идентичны по всем параметрам [11]. Одни из нодальных плоскостей имели крутое ($DP_{NP1}=55-56^\circ$) падение на юго-восток в азимуте $STK_{NP1}=31-32^\circ$, а другие, ориентированные субмеридионально ($STK_{NP2}=180-181^\circ$), – пологое ($DP_{NP2}=38-39^\circ$) погружение на запад.

Макросейсмические сведения об ощутимом землетрясении 15 октября в 03^h35^m получены заведующими сейсмических станций «Алушта» (В.А. Антонюк) и «Ялта» (И.В. Курьянова) с помощью опросов по телефону. Специального детального обследования последствий этого землетрясения не проводилось. К сожалению, в большинстве случаев звонившие не давали сведений, на каком этаже здания они находились в момент землетрясения. В связи с этим, оценки интенсивности могли оказаться несколько завышенными. Получены сведения из 13 населенных пунктов (табл. 4). Обработка полученных данных производилась в соответствии с описательными признаками сейсмической шкалы MSK-64 [14].

Таблица 4. Макросейсмические данные о Южнобережном землетрясении 15 октября 2013 г. в 03^h35^m с $K_T=10.1$

№	Пункт	φ°, N	λ°, E	$\Delta,$ км	Az°	№	Пункт	φ°, N	λ°, E	$\Delta,$ км	Az°
	<u>4 балла</u>					7	пгт Никита	44.51	34.24	9	256
1	пгт Гурзуф	44.55	34.29	6	292	8	пгт Массандра	44.51	34.19	13	263
2	пгт Партенит	44.58	34.34	6	352	9	с. Изобильное	44.70	34.35	19	1
3	г. Ялта	44.50	34.17	16	255	10	пгт Понизовка	44.39	33.95	35	244
	<u>3–4 балла</u>						<u>Не ощущалось</u>				
4	с. Малый Маяк	44.61	34.36	9	6	11	с. Лучистое	44.74	34.40	23	10
5	г. Алушта	44.68	34.41	17	16	12	пгт Гаспра	44.43	34.11	22	240
	<u>≥2 балла</u>					13	п. Мисхор	44.43	34.08	24	243
6	Артек	44.55	34.30	5	300						

Примечание. Эпицентральные расстояния (Δ) и азимуты (Az) рассчитаны от инструментального эпицентра; координаты пунктов округлены до сотых долей градуса.

С наибольшей интенсивностью $I_{max}=4$ балла землетрясение проявилось в г. Ялта, пгт Гурзуф и Партенит: «звенела посуда, раскачивались люстры, дрожали кровати, дребезжали стекла» (на верхних этажах многоэтажных зданий). Испуг среди опрошенных не отмечен, один человек проснулся (г. Алушта, 5 этаж 9-этажного здания). В г. Алушта и пгт Малый Маяк некоторые лежащие почувствовали толчок; дребезжали двери, стекла окон, посуда ($I=3-4$ балла). На первых этажах землетрясение никто не ощущал.

Для пяти населенных пунктов – Артек, Изобильное, Массандра, Никита, Понизовка – интенсивность условно отнесена к $I_i \geq 2$ балла, поскольку результат получен только по единичным опросам респондентов об ощутимости. На карту (рис. 5) эти пункты вынесены со знаком вопроса.

Расчетная интенсивность по формуле из [29, с. 30] для Крыма:

$$I_i = 1.5 M - 3.5 \cdot \lg(r)^{1/2} + 3.0, \tag{1}$$

для этих пяти пунктов получилась в диапазоне от $I=4-5$ баллов для Артека и Никиты до $I=2-3$ балла – для наиболее удаленного пгт Понизовка, что не противоречит полученным единичным сведениям: «сильно дребезжали двери» (Артек), «звенела посуда и шаталась люстра» (Никита, 7 этаж), «ощутил вибрацию лежа» (Массандра), «ощутил толчок» (Изобильное), «ощутил землетрясение на улице» (Понизовка).

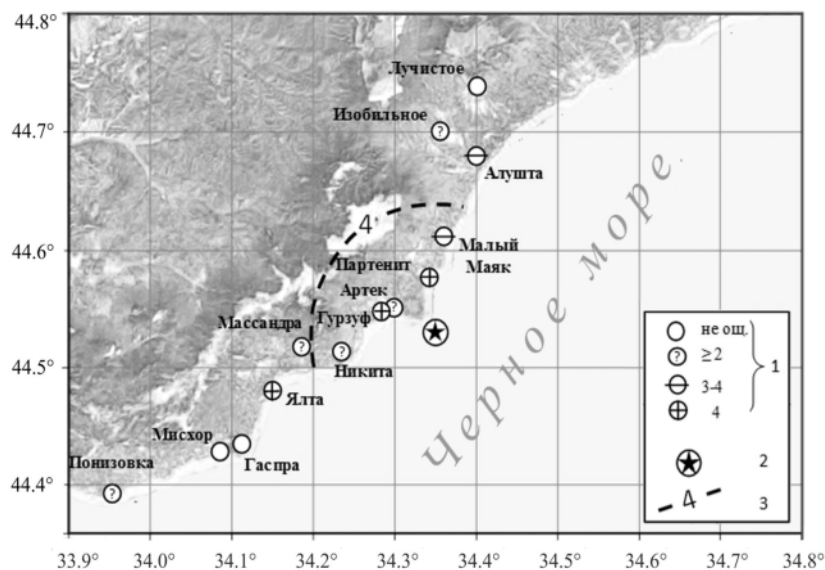


Рис. 5. Карта-схема распределения интенсивности сотрясений при землетрясении 15 октября 2013 г.

1 – интенсивность сотрясений I в баллах шкалы MSK-64, 2 – инструментальный эпицентр, 3 – теоретическая изосейста для $I=4$ балла

Карта-схема распределения наблюдаемой макросейсмической интенсивности землетрясения дана на рис. 5. без проведения изолиний зон балльности в связи с малочисленностью исходной информации. Для сравнения с наблюдаемым распределением «пункт-балл» на карте отмечена теоретическая изосейста $I=4$ балла, рассчитанная по формуле (1).

В **Алуштинском** районе (№ 3) зафиксировано десять слабых землетрясений с $K_{II}=4.7-6.5$, суммарная энергия которых минимальная относительно сейсмической энергии других районов. Очаги четырех землетрясений находились на суше в 7–12 км от г. Алушта и шести – в море, на расстоянии 18–45 км. Глубина всех сейсмических толчков находилась в диапазоне $h=6-22$ км.

В **Судакско-Феодосийском** районе (№ 4), как обычно, наблюдалась редкая сейсмичность. Здесь отмечено только три события с $K_{II}=5.8-7.5$. Их эпицентры удалены в море на расстоянии $\Delta=28-118$ км от г. Судак при глубинах $h=10-28$ км, располагаясь вблизи границы с районом № 3.

Самая высокая сейсмическая активность, относительно других районов, проявилась в **Керченско-Анапском** районе (№ 5). Крымская сеть зарегистрировала 18 землетрясений с $K_{II}=7.1-10.1$ на глубинах от $h=3$ до $h=35$ км. В ежедневной сводке сейсмической станции «Анапа» приведено сообщение о сотрясениях с интенсивностью $I_i=2$ балла в г. Анапа ($\Delta=39$ км) при землетрясении с $K_{II}=9.8$ и глубиной $h=17$ км, зарегистрированном 11 марта в 04^h57^m.

Для наиболее сильного землетрясения из этого района 1 мая в 01^h44^m с $K_{II}=10.1$, $M_{w_{рег}}=3.8$ получено решение механизма очага [11], в соответствии с которым землетрясение произошло под действием горизонтальных ($PL_T=8^\circ$) напряжений растяжения, ориентированных близширотно ($AZM_P=109^\circ$), и близвертикальных ($PL_P=62^\circ$) – сжатия. Тип подвижки в очаге – сбрососдвиг, с преобладанием сбросовой компоненты над сдвиговой (рис. 6). Первая плоскость разрыва $NP1$ имела диагональную ориентацию ($STK_{NP1}=40^\circ$) с наклонным падением ($DP_{NP1}=58^\circ$) на юго-восток, а другая $NP2$ – близмеридиональную ($STK_{NP2}=173^\circ$), также с пологим падением ($DP_{NP2}=43^\circ$) на запад.

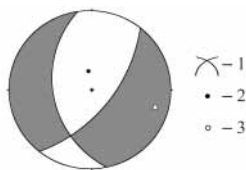


Рис. 6. Диаграмма механизма очага землетрясения 1 мая в 01^h44^m в проекции нижней полусферы

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

В **Черноморской впадине** (район № 9) зарегистрировано три землетрясения с $K_{II}=7.6-9.2$ и глубинами $h=10-21$ км. Наиболее сильное землетрясение с $K_{II}=9.2$ произошло 21 июня в 01^h39^m54.4^s на глубине $h=21$ км.

Обращает на себя внимание факт, что одновременно в трех районах: **Степной Крым** (№ 6), **Азово-Кубанский** (№ 7), **Северо-Западный** (№ 8) наблюдалось полное сейсмическое затишье на уровне представительных землетрясений $K_{II} \geq 8$ (см. рис. 1).

Параметры сейсмического режима: закон повторяемости землетрясений $N(K)$ и сейсмическая активность A_{10} [30] в Крымско-Черноморском регионе в 2013 г. рассмотрены в сравнении с таковыми за 2012 г. [2] и за предшествующие 5 лет (2009–2013 гг.). Надежность оценки параметров закона повторяемости зависит от представительной статистики землетрясений в широком диапазоне энергий, что за один год наблюдений в слабоактивном регионе не обеспечивается. В связи с этим графики повторяемости $N(K)$ построены за период наблюдений 2009–2012 гг. для региона в целом, а также отдельно для центральной зоны региона (районы № 2 и № 3) и Керченско-Анапского района № 5 (рис. 7). Использовано кумулятивное распределение N_{Σ} по энергетическим классам землетрясений K_{II} , начиная от представительного K_i и выше. Аппроксимация графика выполнена методом ортогональной регрессии.

Получено, что в целом для всей совокупности землетрясений график повторяемости прямолинеен и описывается логлинейной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции ρ :

$$\lg N_{\Sigma}=(6.06 \pm 0.25)-(0.48 \pm 0.03) K_{II} \quad (\rho=0.99) \quad \text{– для региона,} \quad (2)$$

$$\lg N_{\Sigma}=(5.20 \pm 0.09)-(0.43 \pm 0.01) K_{II} \quad (\rho=1.0) \quad \text{– для центра (№ 2 и 3),} \quad (3)$$

$$\lg N_{\Sigma}=(5.45 \pm 0.47)-(0.45 \pm 0.05) K_{II} \quad (\rho=0.98) \quad \text{– для района № 5.} \quad (4)$$

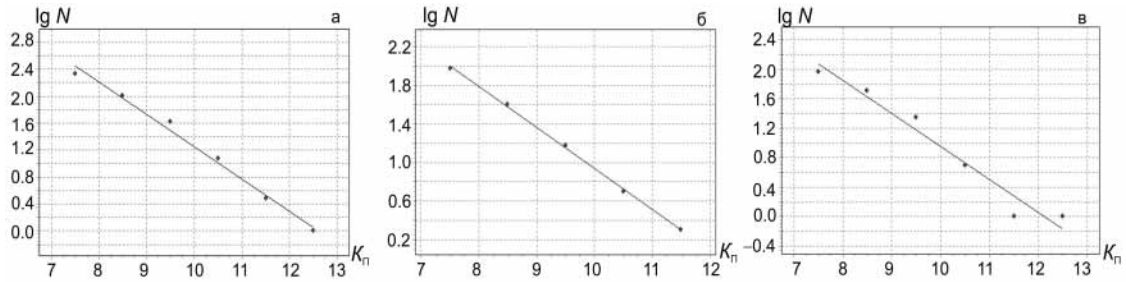


Рис. 7. Графики повторяемости землетрясений за период 2009–2013 гг. для всего региона (а), центральной зоны (б) и Керченско-Анапского района (в)

Как следует из уравнения (2), угловой коэффициент графика повторяемости за последние 5 лет (2009–2013) для всего региона, равный $\gamma=0.48\pm 0.03$, заметно изменился по сравнению с таковым ($\gamma=0.41\pm 0.02$) за период 2008–2012 гг. [2]. В то же время для района № 5 он остался прежним, в пределах погрешностей определяемых величин: $\gamma=0.45\pm 0.05$ (4) и $\gamma=0.46\pm 0.03$ [2].

Оценка сейсмической активности $A=\lg N_0$ и ее картирование выполнены методом установленного качества [30] по уровню $K_0=10$, т.е. использована величина A_{10} . Методика расчета A_{10} такая же, как в [2]. При вычислениях A_{10} использованы параметры углового коэффициента γ из уравнений 2–4.

Построены четыре карты A_{10} : две обзорные для всего региона с шагом $\Delta S_1 = 0.4^\circ \times 0.4^\circ$ при $N_{\Sigma} > 3$ за период 2009–2013 гг. и текущий 2013 г. (рис. 8 а, б), а также детальные карты с меньшим шагом $\Delta S_2 = 0.2^\circ \times 0.2^\circ$, $N_{\Sigma} > 3$ для центра (районы № 2 и № 3) и Керченско-Анапского района № 5 с наибольшей выделенной энергии в 2013 г (рис. 8 в, г).

Наиболее высокий уровень сейсмической активности как за последние пять лет, так и за 2013 г. относится к центральной части региона (рис. 8, а, б). По сравнению с этим, значение $A_{10}=0.08$ в 2012 г. для этой части региона было почти в 5 раз меньше [2].

В детальном масштабе для рассматриваемых районов (рис. 8, в, г) также выделяются места с максимальным и минимальным уровнем активности. Пиковое значения $A_{10}=0.4$ в центральной части региона относится к очаговой зоне ощутимого землетрясения 15 октября 2013 г. (рис. 8, в) и является временной флуктуацией сейсмичности на фоне средних долговременных параметров. В Керченско-Анапской группе очагов (район № 5) уровень A_{10} не изменился по сравнению с таковым в 2012 г. (рис. 8, г).

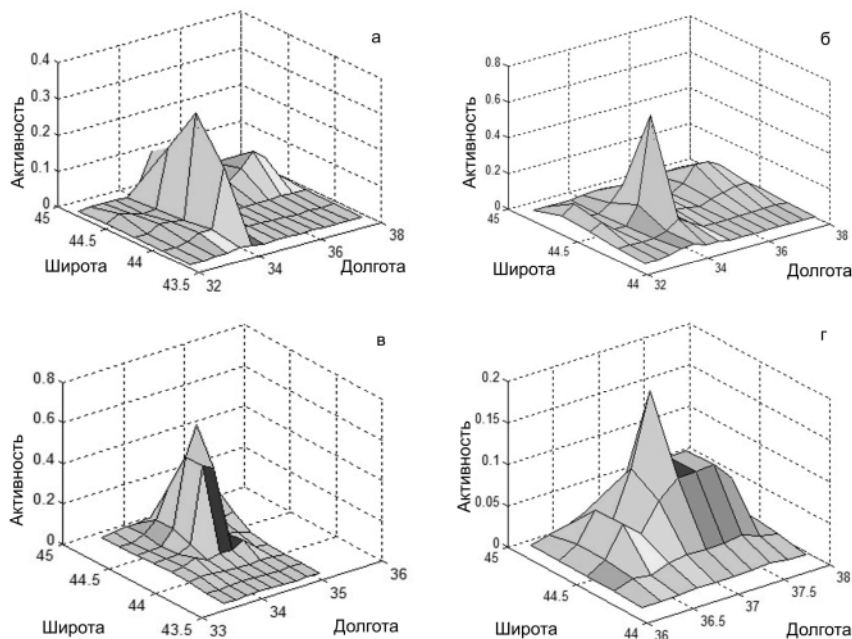


Рис. 8. Карты поверхности сейсмической активности в единицах A_{10} для Крымско-Черноморского региона (а, б) за период 2009–2013 и 2013 г. соответственно и детальные карты для центра (в) и района № 5 (г), за 2013 г.

Тектоническая деформация ϵ и скорость деформирования среды $V\epsilon$ за счет землетрясений рассчитаны, как и в 2012 г., по формуле из [30, 31]:

$$\epsilon = \frac{1}{2\mu \cdot \Delta V} \sum_{i=1}^N M_{0i}; \quad V\epsilon = \frac{\epsilon}{t};$$

где $V\epsilon$ – скорость деформации горных масс, μ – упругий модуль сдвига материала горных пород, ΔV – объемная область, в которой производят расчет, t – интервал времени, N – количество очагов землетрясений за время t в области ΔV , M_{0i} – сейсмический момент i -го очага землетрясения.

В 2013 г. общий вклад от землетрясений в тектоническую деформацию среды элементарного объема был незначительным (рис. 9, а) и составил примерно $2 \cdot 10^{-10}$, как и в предыдущий год [2]. Максимальная скорость деформации $V\epsilon = 1.0 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹ отмечена только в центральной зоне региона. Она связана с ощутимым землетрясением 15 октября 2013 г. с $K_{\Pi} = 10.1$ и серией толчков 9 декабря (рис. 9, б). Для района № 5 за 2013 г. общая деформация среды и скорость соизмеримы с таковыми значениями в целом для региона (рис. 9, в).

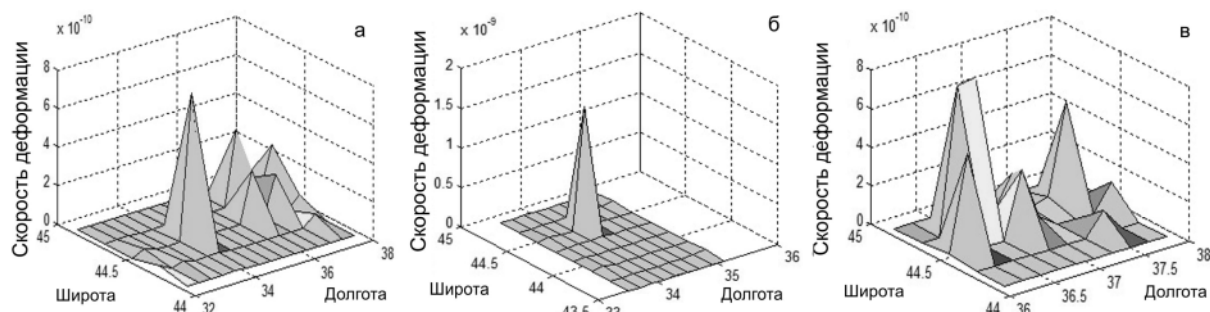


Рис. 9. Пространственное распределение скорости деформации среды ($V\epsilon$) за счет землетрясений в 2013 г. во всем регионе (а), в центральной зоне (б) и в районе 5 (в)

Приведенные значения ϵ и $V\epsilon$ относятся к большим объемам среды, включающим совокупность землетрясений с реальными размерами и местной деформацией в элементарной ячейке. Деформация в очаге конкретного землетрясения на порядок и более превосходит среднюю деформацию по объему очаговой зоны и на несколько порядков – среднюю тектоническую деформацию по всему региону. Так, во время наиболее сильных землетрясений 2013 г. с $K_{\Pi} \geq 9.8$ деформация ϵ среды в очагах составила от $4.4 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ [10].

Рассмотрим изменение со временем скорости тектонической деформации $V\epsilon$ в пределах региона в 2013 г. (рис. 10 а) с осреднением 1 месяц.

Видно, что в 2013 г. (рис. 10, а) значения $V\epsilon$ для всего региона в целом были на порядок выше, чем в предыдущем 2012 г. (рис. 10, б) и находились в диапазоне $V\epsilon = 10^{-11} - 10^{-10}$ год⁻¹. Исключение составляет минимальное значение $V\epsilon = 10^{-15}$ год⁻¹ в сентябре, в период относительного сейсмического затишья во всем регионе.

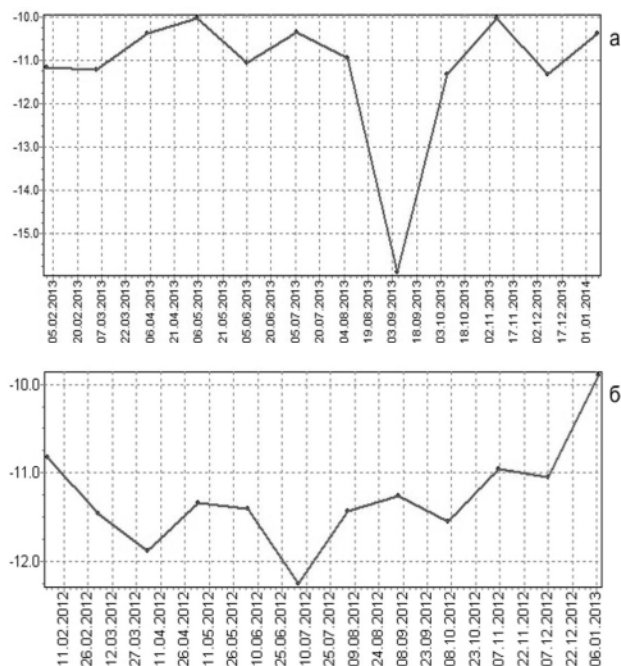


Рис. 10. Изменение со временем скорости деформации среды ($\lg V\epsilon$) за счет землетрясений во всем регионе в 2013 г. (а) и в 2012 г. (б)

Л и т е р а т у р а

1. **Землетрясения в СССР в 1983 году.** – Москва: Наука, 1986. – 325 с.
2. **Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А.** Крымско-Черноморский Регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 49–58.
3. **Панков Ф.Н. (отв. сост.).** Сейсмические станции Крымско-Черноморского региона в 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
4. **Кульчицкий В.Е.** Программа расчета координат гипоцентров землетрясений (GIPO-08) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – С. 28–33.
5. **Пустовитенко Б.Г., Лущик А.В., Боборыкина А.В., Кульчицкий В.Е., Можжерина А.В., Насонкин В.А., Панков Ф.Н., Поречнова Е.Н., Пустовитенко А.А., Тихоненков Э.П., Швырло В.Г.** Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. – 264 с.
6. **Кульчицкий В.Е., Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А.** Об искажении координат гипоцентров местных землетрясений при некорректном использовании экспериментальных данных о кинематических параметрах сейсмических волн // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017 – С. 477–494.
7. **Мехрюшев Д.Ю., Янков А.Ю., Погода Э.В., Даниялов М.Г., Габсатарова И.П., Пойгина С.Г.** Сейсмические станции ГС РАН в хронологии их открытия в аналоговом и/или цифровом варианте, работающие на территории Северного Кавказа в 2009 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – Приложение на CD_ROM.
8. **Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П.** Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
9. **Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.).** Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
10. **Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В.** Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 299–310. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.27
11. **Пустовитенко Б.Г. (отв. сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
12. **Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е.** Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. II. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 113–125.
13. **Hanks T.C., Kanamori H.** A Moment Magnitude Scale // J. Geophys. Res., 1979. – **84.** – N 135. – P. 2348–2350.
14. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага).** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
15. **Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.).** Каталог землетрясений Крыма за 2003 год // Землетрясения Северной Евразии, 2003 год. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – Приложение на CD_ROM.
16. **Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.).** Каталог землетрясений Крыма за 2004 год // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – Приложение на CD_ROM.
17. **Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.).** Каталог землетрясений Крыма за 2005 год ($N=29$) // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – Приложение на CD_ROM.
18. **Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.).** Каталог землетрясений Крыма за 2006 г. ($N=42$) // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – Приложение на CD_ROM.

19. Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2007 г. ($N=49$) // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – Приложение на CD_ROM.
20. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2008 г. ($N=61$) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – Приложение на CD_ROM.
21. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2009 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – Приложение на CD_ROM.
22. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2010 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – Приложение на CD_ROM.
23. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
24. Пустовитенко Б.Г. Форосское землетрясение 18 октября 1998 года $M_c=4.4$; $M_w=4.9$, $I_0=5$ баллов (Крым) // Землетрясения Северной Евразии – Обнинск: ГС РАН, 2004. – С. 240–248.
25. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А. Симеизское землетрясение 12 апреля 2009 г. с $K_{II}=11.2$, $M_w=4.3$, $I_0=4$ (Крым) // Землетрясения Северной Евразии в 2009 г. – Обнинск: ГС РАН, 2015.– С. 284–292.
26. Пустовитенко Б.Г. Некоторые свойства сложных последовательностей землетрясений Крыма // Геодинамика. – 2011. – № 2(11). – С. 257–262.
27. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокации. – Москва: Наука, 1969.– С. 260.
28. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – Москва: Наука, 1972. – 198 с.
29. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. –536 с.
30. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии (Избранные труды). – Москва: Наука, 1985. – 408 с.
31. Юнга С.А. Методы и результаты изучения сейсмических деформаций. – Москва: Наука, 1990. – 191 с.

METADATA IN ENGLISH

CRIMEAN BLACK SEA REGION

B.G. Pustovitenko, V.A. Svidlova, V.S. Knyazeva, M.N. Bondar

*Institute of Seismology and Geodynamics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Simferopol, Russia, seismosilver@mail.ru, bpustovitenko@mail.ru*

Abstract. Sixty four local earthquakes in the energy class K_{II} range from 4.7 to 10.1 were recorded in the Crimea in 2013. The total amount of released seismic energy decreased by two orders of magnitude compared to 2012. The focal mechanism solutions are obtained for three earthquakes: May 1 ($M_{w,reg}=3.8$), October 15 ($M_{w,reg}=3.7$) and December 9 ($M_{w,reg}=3.5$). The earthquake on May 1 occurred in the eastern part of the region under the action of horizontal extensional stress. Two other earthquakes took place in the central zone of the region and indicate horizontal compressional stress. Earthquake on October 15 was felt on the Crimean coast with an intensity of up to 4 (MSK-64). The parameters of the seismic regime for 2013 and the previous 5 years are considered. The highest level of seismic activity $A_{10}=0.4$ in 2013 is attributed to the central part of the region, to the focal zone of a notable earthquake on October 15. In the Kerch-Anapa group of foci the level of A_{10} did not change in comparison with 2012. The total contribution from earthquakes in 2013 to the tectonic deformation of the environment was insignificant, similar to the previous year 2012. The maximum strain rate $V_{\epsilon}=1.0 \cdot 10^{-9} \text{ year}^{-1}$ is associated with a notable earthquake on October 15 and a series of tremors on December 9.

Keywords: Seismicity, representativeness, intensity, focal mechanism, seismic activity, tectonic deformation of the medium, strain rate

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.03

For citation: Pustovitenko, B.G., Svidlova, V. A., Knyazeva, V.S., & Bondar, M.N. (2019). Crimean Black sea region. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 44–55. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.03

R e f e r e n c e s

1. *Zemletryaseniya v SSSR v 1983 godu* (1986). [Earthquakes in the USSR in 1983]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 325 p. (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., & Svidlova, V.A. (2018). Crimean Black Sea region. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21 (2012), 49–58. (In Russ.).
3. Pankov, F.N. (2019). Crimea seismic stations in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
4. Kul'chickij, V.E. (2010). [Program for calculating the coordinates of earthquake hypocenters (GIPO-08)]. In *Seismologicheskii biulleten' Ukrainy za 2008 god* [Ukraine seismological bulletin for 2008] (pp. 28–32). Sevastopol, Ukraine: NPC «ECOSY-Hydrophysics» Publ. (In Russ.).
5. Pustovitenko, B.G., Lushchik, A.V., Boborykina, A.V., Kul'chickij, V.E., Mozhzherina, A.V., Nasonkin, V.A., Pankov, F.N., Porechnova, E.N., Pustovitenko, A.A., Tihonenkov, E.P., & Shvyrlu, V.G. (2014). *Monitoring seismicheskikh processov v Krymsko-Chernomorskom regione* [Monitoring of seismic processes in the Crimean Black Sea region]. Sevastopol, Ukraine: NPC «EKOSI Gidrofizika», 264 p. (In Russ.).
6. Kul'chickij, V.E., Pustovitenko, B.G., & Svidlova, V.A. (2017). [About distortion of the coordinates of hypocenters of local earthquakes with incorrect use of experimental data on the kinematic parameters of seismic waves]. In *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii 2011* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2011] (pp. 477–494). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
7. Mekhryushev, D.Yu., Yankov, A.Yu., Pogoda, E.V., Daniyalov, M.G., Gabsatarova, I.P., & Pojgina, S.G. (2015). [Seismic stations of the GS RAS in the chronology of their discovery in analog and/or digital versions, operating in the North Caucasus in 2009]. In *Zemletryaseniya Severnoj Evrazii 2009* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2009]. Appendix on CD. (In Russ.).
8. Krasilov, S.A., Kolomiets, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of Digital Seismic Data Processing Using a Software Package WSG]. In *Materialy I Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"*. [Proceedings of the I International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 77–83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
9. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2019). Catalog of the earthquakes of the Crimean Black Sea region in 2013 *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
10. Pustovitenko B.G., & Kalinyuk I.V. (2019). Source parameters of Crimean-Black Sea Region Earthquakes. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 299–310. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.27
11. Pustovitenko, B.G. (2019). Catalog of Earthquake Focal Mechanisms of the Crimean Black Sea Region for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
12. Pustovitenko B.G., & Kul'chickij, V.E. (1974). [On the energy assessment of the earthquakes of the Crimean Black Sea region]. In *Magnituda i energeticheskaya klassifikatsiia zemletriasenii, tom 2* [Magnitude and energy classification of earthquakes, vol. 2] (pp. 113–125). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
13. Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.
14. Medvedev, S.V., Shponhojer, V., & Karnik, V. (1965). *Shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MCC AS USSR Publ., 11 p.
15. Svidlova, V.A., Sykchina, Z.N., & Kozinenko, N.M. (2009). [Catalog of Crimea earthquakes in 2003]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2003* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2003]. Obninsk: GS RAS Publ. Appendix on CD. (In Russ.).
16. Svidlova, V.A., Sykchina, Z.N., & Kozinenko, N.M. (2010). [Catalog of Crimea earthquakes in 2004]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2004 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2004] (Appendix on CD).

- Obninsk, Russia: GS RAS. (In Russ.).
17. Svidlova, V.A., Sykchina, Z.N., & Kozinenko, N.M. (2011). [Catalog of Crimea earthquakes in 2005]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2005 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2005] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 18. Svidlova, V.A., Sykchina, Z.N., & Kozinenko, N.M. (2012). [Catalog of Crimea earthquakes in 2006]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2006 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2006] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 19. Svidlova, V.A., Sykchina, Z.N., & Kozinenko, N.M. (2013). [Catalog of Crimea earthquakes in 2007]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2007 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2007] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 20. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2014). [Catalog of Crimea earthquakes in 2008]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2008 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 21. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2015). [Catalog of Crimea earthquakes in 2009]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2009 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2009] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 22. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2016). [Catalog of Crimea earthquakes in 2010]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2010 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2010] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 23. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2017). [Catalog of earthquakes in the Crimean Black Sea region for 2011]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2011 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2011] (Appendix on CD). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 24. Pustovitenko, B.G. (2004). [Foros earthquake on October 18, 1998, $M_c=4.4$, $M_w=4.9$, $I_0=5$ points (Crimea)]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii v 1998 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia in 1998] (pp. 240–248). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 25. Pustovitenko, B.G., & Pustovitenko, A.A. (2015). [Simeiz earthquake on April 12, 2009 with $K_n=11.2$, $M_w=4.3$, $I_0=4$ (Crimea)]. *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii v 2009 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia in 2009] (pp. 284–292). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 26. Pustovitenko, B.G. (2011). [Some properties of complex sequences of earthquakes in Crimea]. *Geodinamika* [Geodynamics], 2 (11), 257–262. (In Russ.).
 27. Vvedenskaya, A.V. (1969). *Issledovanie napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacii* [Investigation of stresses and ruptures in earthquake foci using dislocation theory]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 260 p.
 28. Balakina, L.A., Vvedenskaya, A.V., Golubeva, N.V., Misharina, L.A., & Shirokova, E.I. (1972). *Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij* [The field of elastic stress of the Earth and the mechanism of earthquake foci]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 198 p.
 29. Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (1977). *New Catalog of Strong Earthquakes in the Territory of the USSR from Ancient Times to 1975*. Academy of Sciences, Moscow (English translation, updated through 1977, available as Report SE-31, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Boulder, CO, 606 pp.).
 30. Riznichenko, Yu.V. (1985). *Problemy seismologii (Izbrannye Trudy)* [Problems of Seismology (Selected Works)]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 408 p.
 31. Yunga, S.A. (1990) *Metody i rezul'taty izucheniya sejsmicheskikh deformacij* [Methods and results of the study of seismic deformations]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 191 p.