

## КРЫМ

*А.Н. Пустовитенко, Б.Г. Пустовитенко, Е.И. Поречнова, В.А. Свидлова, З.Н. Сыкчина*

В связи с неполным финансированием службы сейсмологических наблюдений сеть сейсмических станций Крыма в 1998 г. работала частично в измененном режиме. Из-за отключения электроэнергии не действовала станция «Ялта» с 17 сентября по 1 октября и с третьей декады ноября до конца года. Станция «Судак» была переведена со 2-й декады августа с трехкомпонентной на двухкомпонентную регистрацию из-за отсутствия нужного формата фотобумаги. В апреле к восьми стационарным сейсмическим станциям (табл. 1) добавился выносной пункт наблюдений «Донузлав» – наземный вариант, организованный в с. Новоивановка вместо уничтоженного местными жителями скважинного пункта.

**Таблица 1.** Сейсмические станции Крыма, работавшие в 1998 г.

№	Станция			Дата открытия	Координаты			Принадлежность
	Название	Код			φ°, N	λ°, E	h <sub>y</sub> , м	
		межд.	рег.					
1	Ялта (не работала с 17.09 по 30.09 и с 21.11 по 31.12.1998 г.)	YAL	Ялт	12.09.1927	44.48	34.15	23.6	Отдел сейсмологии
2	Феодосия	FEO	Фдс	11.10.1927	45.02	35.39	40	–"–
3	Симферополь	SIM	Смф	14.05.1928	44.95	34.12	275	–"–
4	Севастополь	SEV	Свс	28.06.1928	44.54	33.68	42	–"–
5	Алушта	ALU	Алш	03.10.1951	44.68	34.40	61	–"–
6	Казантип	KZP	Кзн	08.09.1981	45.45	35.84	3	–"–
7	Судак	SDK	Суд	18.10.1988	44.89	35.00	108	–"–
8	Керчь		Крч	19.05.1997	45.31	36.46	50	–"–
9	Донузлав		Днз	20.04.1998	45.45	33.10	80	Крымский экспертный совет

Параметры используемой на сейсмических станциях аппаратуры и режим работы приведены в табл. 2, 3. Основные отличия в параметрах, в сравнении с предыдущим периодом наблюдений [1], отмечены на сейсмических станциях «Симферополь», «Севастополь», «Донузлав» и «Керчь». На станции «Симферополь» был изучен фон современных помех на горизонтальных составляющих и сделан вывод о возможности поднять эффективное увеличение приборов в два раза без изменения полосы пропускания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Физические параметры сейсмометров и гальванометров позволили довести эффективное увеличение только до  $V_{\max}=16000$  при  $T_{\max}=0.1-0.8$  с. Однако и такое изменение в АЧХ привело к заметному улучшению качества регистрации слабых местных землетрясений.

На станции «Севастополь» также изменена характеристика АЧХ. Это связано с тем, что к 1998 г. был израсходован запас коллиматорных 2.5-вольтовых лампочек, на которых работали все станции. Выход был найден в переводе регистрации на гальванометры ГБ-III, осветители которых могут работать на 7-вольтовых лампочках без ухудшения качества записи. Однако добиться прежнего уровня увеличения  $V_{\max}=30000$  с новыми гальванометрами не удалось. Пришлось снизить уровень до  $V_{\max}=20000$ , т.е. в полтора раза. Мера эта рассматривалась как временная. Предполагалось, что с улучшением экономической ситуации в стране будет произведен обратный переход на прежний уровень увеличения.

В конце 1997 г. была проведена пробная регистрация на станции «Донузлав», расположенной в 7 километрах от прежнего пункта наблюдений в глубокой скважине «Донузлавская». Вначале регистрация велась двумя электронными каналами (вертикальным и горизонтальным)

при  $V_{\max}=10000$ ,  $T_{\max}=0.1-0.8$  с, но с апреля 1998 г. началась стационарная регистрация на одной вертикальной составляющей колебаний. Регистрация с остановками на ремонт и профилактику аппаратуры длилась до конца 1998 г.

**Таблица 2.** Параметры сейсмографов основных каналов сейсмических станций Крыма в 1998 г.

№	Название станции	Тип прибора	Компоненты	$T_s$ , с	$D_s$	$T_g$ , с	$D_g$	$\sigma^2$	$V_{\max}$	$T_{\max}$ , с	Скорость развертки, мм/мин
1	Симферополь с 07.05.1998 г.	СХ	N, E	1.00	0.70	0.36	3.00	0.1	10000	0.1-0.8	60
			N, E	1.00	0.70	0.36	3.00	0.225	16000	0.1-0.8	60
			Z	1.00	0.70	0.36	4.20	0.12	10000	0.1-0.8	60
		СКД СД-1	N, E, Z	25.00	0.50	1.20	8.00	0.1225	1000	0.2-18	30
			N	25.00	1.00	103.0	0.50	0.175	700	16-56	15
			E	25.00	1.0	99	0.54	0.155	700	16-56	15
			Z	25.00	1.00	82	0.46	0.192	1000	16-56	15
2	Севастополь	СКМ-3	N	1.00	0.7	0.20	3.60	0.198	20000	0.1-0.7	60
			E	1.00	0.7	0.20	3.60	0.175	20000	0.1-0.7	60
			Z	1.00	0.7	0.20	3.60	0.229	20000	0.1-0.7	60
		УСФ	N, E	0.50	-	0.36	-	-	300000*	0.2-0.4	60
			Z	0.50	-	0.36	-	-	100000*	0.2-0.4	60
3	Ялта	СХ	N, E, Z	0.75	0.70	0.29	2.00	0.19	20000	0.2-0.5	60
4	Алушта	СХ	N	0.76	0.74	0.22	1.74	0.25	20000	0.2-0.5	60
			E	0.76	0.74	0.22	1.74	0.035	20000	0.2-0.5	60
			Z	0.88	0.90	0.22	1.60	0.35	20000	0.2-0.5	60
5	Судак	СКМ-3	N	1.00	0.70	0.27	1.80	0.0155	20000	0.1-0.6	60
			E, Z	1.00	0.7	0.27	1.8	0.018	20000	0.1-0.6	60
6	Феодосия	СХ	N, E	1.00	0.70	0.40	3.60	0.040	10000	0.1-0.7	60
			Z	1.00	0.7	0.4	3.60	0.019	10000	0.1-0.7	60
7	Казантип	СМ-ЗКВ	N, E, Z	1.00	-	-	-	-	1900*	0.3-0.7	60
8	Керчь	ВЭГИК	N	0.64	0.35	0.10	3.50	0.16	10000*	0.1-0.5	60
			E	0.64	0.35	0.10	3.50	0.19	10000	0.1-0.5	60
			Z	0.64	0.35	0.10	2.00	0.099	5000	0.1-0.5	60

Примечание. Знаком \* помечены сейсмографы с электронными усилителями.

**Таблица 3.** Параметры сейсмографов заглубленных каналов в 1998 г.

№	Название станции	Тип прибора	Компоненты	$T_s$ , с	$D_s$	$T'_g$ , с	$D'_g$	$(\sigma^2)'$	$V_{\max}$	$T_{\max}$ , с	Скорость развертки, мм/мин
1	Симферополь	СХ	N, E	1.00	0.60	0.09	12.0	$2.9 \cdot 10^{-3}$	500	0.1-0.8	360
			Z	1.00	0.60	0.09	12.0	$3.5 \cdot 10^{-3}$	500	0.1-0.8	360
		СКД	N	25.00	0.50	1.40	7.0	$1.28 \cdot 10^{-4}$	50	0.2-17	30
			E	25.00	0.50	1.30	7.4	$2.68 \cdot 10^{-4}$	50	0.2-17	30
			Z	25.00	0.50	1.15	8.4	$2.2 \cdot 10^{-4}$	50	0.2-17	30
2	Севастополь	СКМ-3	N	1.00	0.70	0.20	3.5	$1.4 \cdot 10^{-3}$	3000	0.1-0.6	120
			E	1.00	0.70	0.20	3.5	$1.1 \cdot 10^{-3}$	1000	0.1-0.6	120
			Z	1.00	0.70	0.20	3.7	$1.38 \cdot 10^{-3}$	1000	0.1-0.6	120
3	Ялта	СХ	N	0.75	0.70	0.20	3.0	$7.47 \cdot 10^{-4}$	1000	0.1-0.5	60
			E	0.75	0.70	0.14	4.0	$5.25 \cdot 10^{-3}$	2000	0.1-0.5	60
			Z	0.75	0.70	0.20	3.0	$9.5 \cdot 10^{-4}$	1000	0.1-0.5	60
4	Алушта	СХ	N	0.76	0.74	0.19	2.0	$9.3 \cdot 10^{-4}$	1000	0.1-0.5	120
			E	0.76	0.74	0.19	2.0	$4.2 \cdot 10^{-4}$	2000	0.1-0.5	120
			Z	0.88	0.90	0.22	1.8	$1.96 \cdot 10^{-3}$	1000	0.1-0.5	120
5	Судак	СКМ-3	N, E, Z	0.91	0.70	0.09	5.2	$7.3 \cdot 10^{-4}$	1000	0.15-0.6	120

На станции «Керчь» в течение 1997 г. велась регистрация с полосой пропускания  $T_{\max}=0.1-0.8$  с [1]. За этот период выяснилось, что во время сильных штормов фон помех резко возрастает и запись землетрясений становится нечитаемой. В декабре 1997 г. были внесены коррективы в параметры аппаратуры, в результате чего полоса пропускания новой АЧХ ограничилась периодами  $T_{\max}=0.1-0.5$  с. На этой АЧХ станция работала весь 1998 год. К сожалению, в процессе регистрации были частые перерывы записи по отдельным составляющим по причине обрыва подвесных нитей хрупких гальванометров ГБ-IV.

**Сейсмичность.** В 1998 г. Крымской сетью сейсмических станций зарегистрировано 89 землетрясений с энергетическими классами  $K_{\Pi}=3.4-12.0$ , из них для 84 определены координаты гипоцентров. В каталоге [2] приведены землетрясения с  $K_{\Pi} \geq 5$ , общее число которых составило 79. Их распределение по классам и районам дано в табл. 4. Четыре сейсмических события за 4–5 июня [2], произошедшие вблизи сейсмической станции «Казантип», трудно однозначно идентифицировать с тектоническими землетрясениями, но в то же время нет никаких сведений о промышленных или каких-либо других взрывах за этот отрезок времени. Волновые формы этих событий также невозможно визуально сопоставить с записями известного здесь роя землетрясений 8–10 апреля 1987 г. [3] из-за существенного изменения способа регистрации сейсмических колебаний (в 1991 г. регистрация на станции «Казантип» стала осуществляться с помощью электромеханических самописцев вместо фотооптической записи). Пространственное распределение землетрясений с энергетическим классом  $K_{\Pi} > 5.5$  дано на рис. 1.

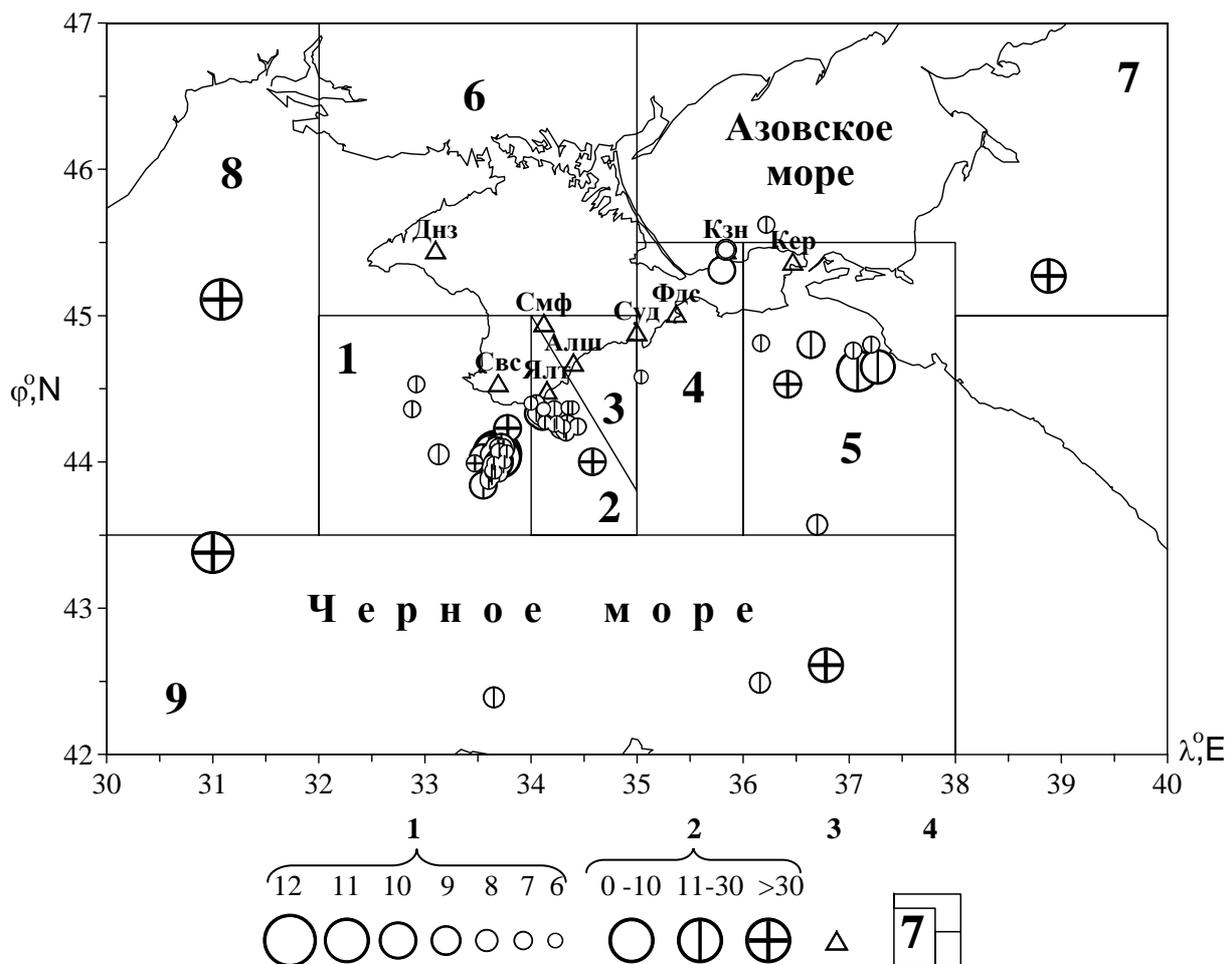


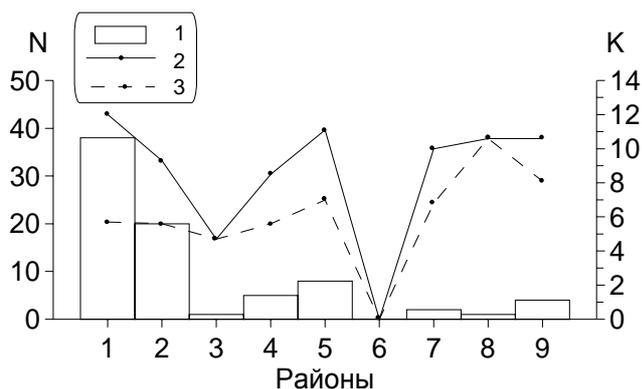
Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымского региона за 1998 г.

1 – энергетический класс; 2 – глубина  $h$  гипоцентра, км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница района и его номер.

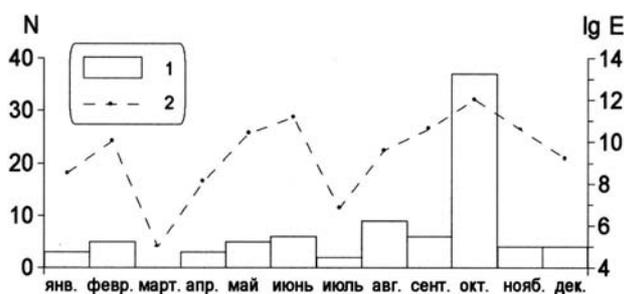
**Таблица 4.** Распределение числа землетрясений по энергетическим классам  $K_{II}$  и суммарная сейсмическая энергия  $\Sigma E$  по районам

№	Район	$K_{II}$								$N_{\Sigma}$	$\Sigma E \cdot 10^9$ , Дж
		5	6	7	8	9	10	11	12		
1	Севастопольский	–	6	16	6	5	3	1	1	38	1059.164
2	Ялтинский	–	8	7	2	3	–	–	–	20	4.082
3	Алуштинский	1	–	–	–	–	–	–	–	1	0.000
4	Судакский	–	1	1	2	1	–	–	–	5	0.468
5	Керченско-Анапский	–	–	3	1	2	1	1	–	8	153.278
6	Степной Крым	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7	Азово-Кубанский	–	–	1	–	–	1	–	–	2	10.006
8	Северо-Западный	–	–	–	–	–	1	–	–	1	39.811
9	Черноморская впадина	–	–	–	2	–	1	1	–	4	44.117
	Всего	1	15	28	13	11	7	3	1	79	1310.927

Как и в 1997 г. [1], максимальное число землетрясений зарегистрировано в **Севастопольском (№ 1)** и **Ялтинском (№ 2)** районах (табл. 4, рис. 2). В первом из них отмечено ощутимое землетрясение 18 октября в 05<sup>h</sup>22<sup>m</sup> с максимальным энергетическим классом  $K_{II}=12.0$ . Оно характеризуется сложной последовательностью форшоков и афтершоков. Ему посвящена отдельная статья в наст. сб. [4]. Землетрясения такого энергетического уровня не наблюдалось в Севастопольском районе 12 лет.



**Рис. 2.** Распределение по районам числа землетрясений (1), максимального (2) и минимального (3) наблюдаемого значения энергетического класса  $K_{II}$



**Рис. 3.** Распределение числа землетрясений (1) и логарифма выделившейся суммарной энергии (2) в регионе по месяцам

Два ощутимых землетрясения произошли в **Керченско-Анапском районе (№ 5)**. Первое реализовалось 21 июня в 12<sup>h</sup>47<sup>m</sup> с  $K_{II}=11.1$  и ощущалось в Анапе с интенсивностью сотрясений до 4 баллов, в Новороссийске – 2 балла [2]. Второе произошло 26 июня в 02<sup>h</sup>24<sup>m</sup> с  $K_{II}=10.4$ . Максимальная интенсивность вызванных им сотрясений достигла 4–4.5 баллов в Анапе, Новороссийске. Макросейсмические данные приведены из бюллетеня станции «Анапа». Одно землетрясение с  $K_{II}=10.6$  отмечено 30 сентября в 08<sup>h</sup>32<sup>m</sup> в **районе Черноморской впадины (№ 9)**. Наименьшей сейсмической активностью характеризуется **Алуштинский район (№ 3)** и **Степной Крым (№ 6)**, в которых не зарегистрировано ни одного сейсмического события с энергетическим классом более 5.

Наибольшее количество выделившейся энергии приходится на февраль, июнь и октябрь (рис. 3), а максимум числа зарегистрированных землетрясений – на октябрь, как и в 1997 г. [1]. На рис. 4 показано распределение числа и суммарной сейсмической энергии землетрясений по годам за 10 последних лет. Видно, что после трехлетнего относительного затишья в 1995–1997 гг. в регионе произошла активизация сейсмического процесса, при этом возросло не только общее число слабых толчков, но и величина суммарной их энергии в основном за счет серии землетрясений 16–18 октября 1998 г.

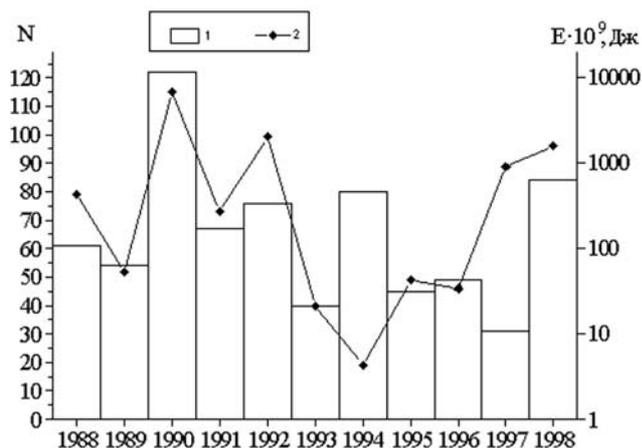


Рис. 4. Распределение числа землетрясений (1) и суммарной выделившейся энергии (2) в регионе за 10 лет

**Спектральные и динамические параметры очагов.** В 1998 г. рассчитано 35 амплитудных и энергетических спектров для 12 землетрясений Крыма в диапазоне эпицентральных расстояний  $\Delta=47-375$  км с энергетическими классами  $K_{II}=9.0-12.0$ . Волновые формы землетрясений в основном получены на региональных высокочувствительных станциях «Алушта», «Симферополь», «Севастополь», «Судак», «Феодосия», «Ялта» (табл. 1). Для получения спектров ощутимого землетрясения 18 октября были привлечены записи каналов пониженной чувствительности (КПЧ) и среднепериодной аппаратуры СКД (табл. 2, 3). Методика оцифровки сейсмограмм и расчета спектральных и очаговых параметров описана в [5].

На рис. 5 представлены примеры амплитудных спектров и результаты их аппроксимации. Спектры достаточно хорошо удовлетворяют модели Вгуне [6], что позволяет уверенно выделить угловую частоту  $f_0$  и спектральную плотность  $\Omega_0$  для расчета динамических параметров очагов.

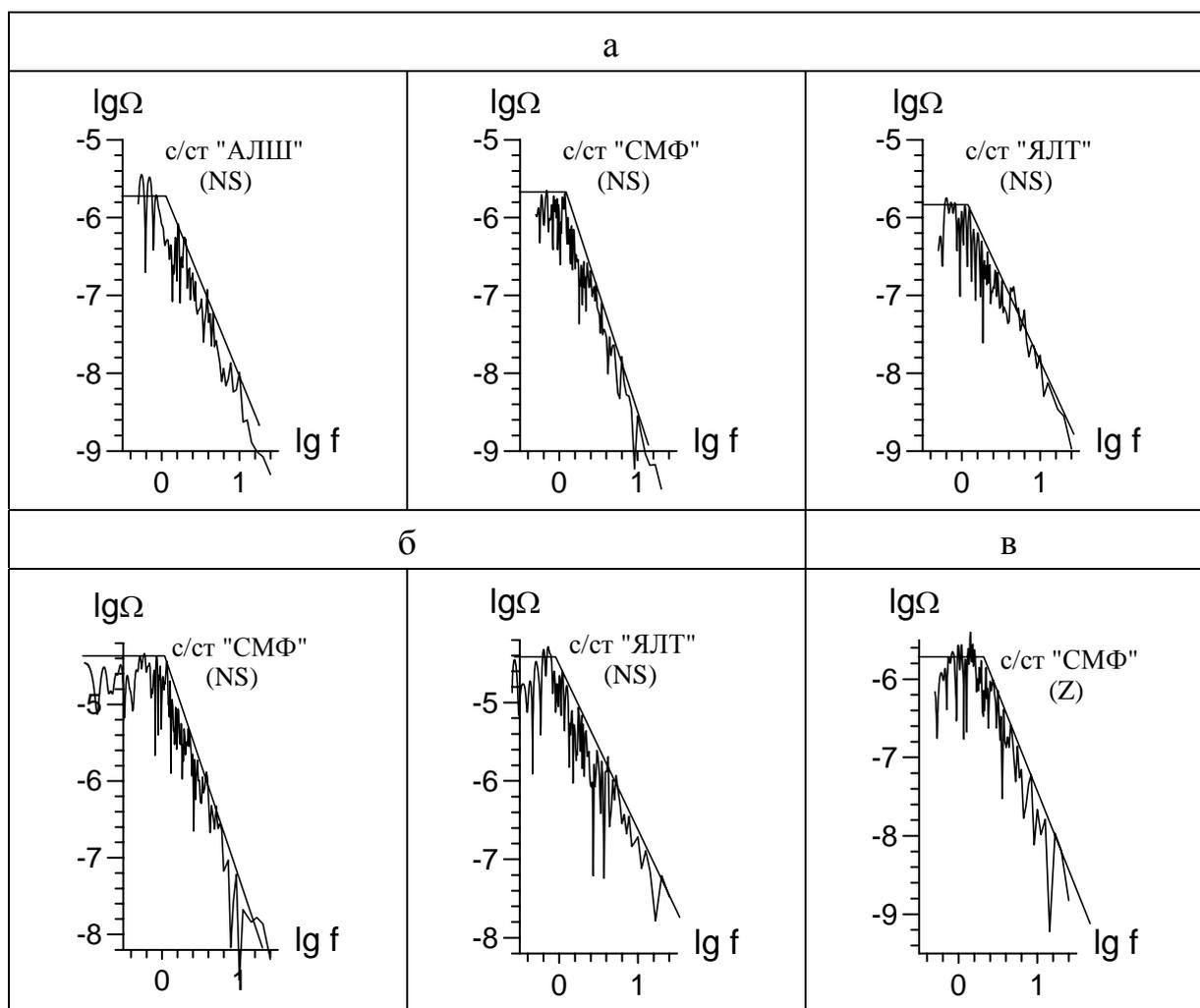


Рис. 5. Примеры амплитудных спектров землетрясений за 1998 г.

а – 16 октября в  $15^h27^m$  с  $K_{II}=9.5$ ; б – 18 октября в  $05^h27^m$  с  $K_{II}=8.9$ ; в – 5 ноября в  $21^h59^m$  с  $K_{II}=10.6$ .

Рассчитаны следующие очаговые параметры: сейсмический момент  $M_0$ , радиус круговой дислокации  $r_0$ , сброшенное напряжение  $\Delta\sigma$ , деформация сдвига  $\epsilon$  и средняя подвижка по разрыву  $\bar{u}$  (табл. 5). В табл. 5 приведены также средние значения динамических параметров  $S$  по всем станциям и составляющим записи, определенные с использованием логнормального закона распределения величин [5], и моментные магнитуды  $M_w$ , рассчитанные по станционным и средним значениям сейсмических моментов по формуле Канамори [7]:

$$M_w = 2/3 \lg M_0 - 10.7.$$

Наблюдается хорошее согласие между индивидуальными и средними значениями  $M_w$ . Магнитудная параметризация землетрясений Крыма по  $M_w$  с 1998 г. внедрена в практику формирования регионального каталога землетрясений [2].

**Таблица 5.** Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 1998 г.

Название станции	Компонента	$\Delta$ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$ , м·с	$f_0$ , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$ , Н·м	$M_w$	$r_0$ , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$ , Па	$\epsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$ , м
Землетрясение 15 февраля: $t_0=17^h37^m22.8^s$ , $\varphi=45.27^\circ$ , $\lambda=38.88^\circ$ , $h=35$ км, $K_{II}=10.0$										
Симферополь	Е	375	0.525	1.12	69.87	3.9	1.18	1.86	6.20	0.53
Землетрясение 21 июня: $t_0=12^h47^m53.6^s$ , $\varphi=44.62^\circ$ , $\lambda=37.08^\circ$ , $h=12$ км, $K_{II}=11.1$										
Алушта	Z	212	0.098	2.46	19.005	3.5	0.85	1.339	4.46	0.276
Судак	Z	167	0.251	2.82	38.529	3.7	0.75	4.092	13.64	0.736
Ялта	Z	232	0.129	3.31	27.411	3.6	0.63	4.728	15.76	0.723
$S$					27.176	3.6	0.74	2.96	9.86	0.528
Землетрясение 26 июня: $t_0=02^h24^m13.3^s$ , $\varphi=44.65^\circ$ , $\lambda=37.27^\circ$ , $h=28$ км, $K_{II}=10.4$										
Алушта	N	227	0.589	1.51	47.605	3.8	0.88	3.083	10.28	0.654
Алушта	Z	227	0.021	3.72	6.26	3.2	0.62	1.148	3.83	0.172
Симферополь	Е	251	1.380	1.01	123.239	4.0	1.32	2.368	7.89	0.753
Судак	N	181	0.562	2.63	36.405	3.7	0.51	12.408	41.36	1.512
Судак	Z	181	0.047	3.64	11.226	3.3	0.64	1.927	6.42	0.295
Феодосия	N	153	1.227	1.66	67.486	3.9	0.80	5.757	19.19	1.113
Феодосия	Z	153	0.053	2.95	10.694	3.3	0.78	0.980	3.27	0.185
Ялта	Z	247	0.054	2.88	17.482	3.5	0.80	1.494	4.98	0.289
$S$					25.7	3.6	0.76	2.532	8.44	0.467
Землетрясение 17 августа: $t_0=23^h35^m52.7^s$ , $\varphi=42.61^\circ$ , $\lambda=36.78^\circ$ , $h=33$ км, $K_{II}=9.6$										
Алушта	Е	299	0.066	3.64	7.029	3.2	0.37	6.321	21.07	0.558
Симферополь	N	336	0.050	2.29	5.979	3.2	0.58	1.340	4.47	0.188
Ялта	Е	297	0.036	4.08	3.835	3.0	0.33	4.877	16.26	0.383
$S$					5.442	3.1	0.41	3.457	11.52	0.342
Землетрясение 21 сентября: $t_0=14^h01^m15.8^s$ , $\varphi=44.33^\circ$ , $\lambda=34.07^\circ$ , $h=25$ км, $K_{II}=9.2$										
Алушта	Z	47	0.219	1.78	15.254	3.4	1.30	0.307	1.02	0.096
Симферополь	N	69	0.083	3.16	2.158	2.9	0.42	1.279	4.26	0.130
$S$					5.738	3.1	0.74	0.626	2.09	0.112
Землетрясение 30 сентября: $t_0=08^h32^m02.6^s$ , $\varphi=43.38^\circ$ , $\lambda=31.00^\circ$ , $h=33$ км, $K_{II}=10.6$										
Судак	Е	360	0.269	1.78	34.402	3.7	0.75	3.625	12.08	0.653
Землетрясение 16 октября: $t_0=15^h24^m09.0^s$ , $\varphi=44.03^\circ$ , $\lambda=33.71^\circ$ , $h=30$ км, $K_{II}=10.5$										
Симферополь	N	107	7.943	1.02	312.033	4.3	1.31	6.163	20.54	1.941
Симферополь	N	107	12.303	0.96	483.281	4.4	1.38	8.035	26.78	2.680
Симферополь	Z	107	1.097	2.82	159.578	4.1	0.82	12.732	42.44	2.518
$S$					288.708	4.3	1.14	8.575	28.58	2.357
Землетрясение 16 октября: $t_0=15^h27^m53.9^s$ , $\varphi=44.00^\circ$ , $\lambda=33.67^\circ$ , $h=19$ км, $K_{II}=9.5$										
Алушта	N	95	1.862	1.29	50.483	3.8	0.98	2.376	7.92	0.560
Алушта	Z	95	0.034	3.72	3.401	3.0	0.59	0.734	2.45	0.104
Симферополь	N	111	2.042	1.14	64.342	3.8	1.11	2.07	6.90	0.554
Судак	Z	144	0.079	1.90	11.941	3.4	1.15	0.347	1.16	0.096
Ялта	N	66	1.413	1.29	27.147	3.6	0.98	1.278	4.26	0.301
$S$					20.455	3.5	0.94	1.099	3.66	0.248

Название станции	Компонаента	$\Delta$ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$ , м·с	$f_0$ , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$ , Н·м	$Mw$	$r_0$ , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$ , Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$ , м
Землетрясение 16 октября: $t_0=15^h31^m36.9^s$ , $\varphi=44.08^\circ$ , $\lambda=33.63^\circ$ , $h=31$ км, $K_{II}=10.1$										
Симферополь	N	104	2.512	1.14	96.361	4.0	1.17	2.636	8.79	0.745
Землетрясение 18 октября: $t_0=01^h57^m47.5^s$ , $\varphi=44.05^\circ$ , $\lambda=33.65^\circ$ , $h=29$ км, $K_{II}=9.8$										
Алушта	E	92	1.778	1.35	60.638	3.8	0.99	2.787	9.29	0.662
Алушта	Z	92	0.148	1.74	18.684	3.5	1.33	0.351	1.17	0.112
Севастополь	N	55	0.427	1.9	9.376	3.3	0.70	1.212	4.04	0.204
Симферополь	Z	107	0.269	2.63	39.084	3.7	0.88	2.543	8.48	0.538
Ялта	N	63	2.239	1.41	54.885	3.8	0.94	2.892	9.64	0.657
S					29.617	3.6	0.95	1.542	5.14	0.352
Землетрясение 18 октября: $t_0=05^h22^m10.0^s$ , $\varphi=44.05^\circ$ , $\lambda=33.68^\circ$ , $h=22$ км, $K_{II}=12.0$										
Симферополь*	N	105	41.687	1.14	3025.9	5.0	1.11	97.33	324.44	26.055
Ялта**	N	61	40.80	1.08	2115.3	4.9	1.36	36.9	123.1	12.1
S					2530.0	4.9	1.23	59.96	199.9	17.8
Землетрясение 5 ноября: $t_0=21^h59^m50.2^s$ , $\varphi=45.11^\circ$ , $\lambda=31.08^\circ$ , $h=33$ км, $K_{II}=10.6$										
Симферополь	Z	239	2.291	1.82	723.86	4.5	1.27	15.53	51.77	4.758

Примечание. Знаками \* и \*\*помечены среднепериодный канал СКД и канал пониженной чувствительности КПЧ.

**Совершенствование энергетической классификации землетрясений.** До 1998 г. оценка энергетических характеристик местных крымско-черноморских землетрясений по записям станции «Судак» проводилась по номограмме Пустовитенко, Кульчицкого  $K_{II}$  [8] с использованием среднего затухания энергии сейсмических волн, полученного для станции «Алушта». Построить собственные калибровочные кривые затухания объемных волн на пути очаг – станция «Судак» традиционным способом оказалось затруднительно из-за малой статистики за короткий срок работы станции (1988 – 1998 гг.).

В работах [9, 10] было показано, что надежным инструментом для построения энергетических и магнитудных шкал, как местных, так и близких землетрясений, является амплитудный уровень сейсмической коды. Кроме этого можно построить надежные калибровочные кривые затухания объемных волн даже по малому числу данных [11, 12] при нормировке амплитуд объемных волн к сейсмической коде.

Для получения калибровочных кривых и построения новых номограмм энергетической классификации землетрясений по данным станции «Судак» исследованы записи 26 местных землетрясений в диапазоне энергетических классов  $K_{II}=8-13$ , произошедших на расстоянии 22–320 км [13]. Построение индивидуальных и сводных огибающих сейсмической коды выполнено в двойном логарифмическом масштабе с привязкой к единой оси времени  $t_c-t_0$ . За время отсчета сейсмической коды  $t_c$  принято время выхода огибающей нерегулярных волн на асимптоту при  $t_c-t_0 \geq 3t_s$ , где  $t_s$  – время пробега поперечной волны  $S$ ,  $t_0$  – время в очаге.

Полученная сводная огибающая коды по станции «Судак» имеет две ветви (рис. 6), каждая из которых хорошо описывается теоретической кривой вида [9]:

$$G(t) = C(t_c - t_0)^{-\nu} \exp \left[ -\pi \left( \frac{t_c - t_0}{QT} \right) \right]$$

при одинаковом значении  $\nu=0.75$  и различных параметрах  $C$  и  $Q$ . Возникновение двух ветвей связано с разной добротностью  $Q$  глубинной среды, в которой формируются и распространяются рассеянные сейсмические колебания. С заглублением волновых путей в формирование коды вовлекаются более высокодобротные слои и, следовательно, кода затухает медленнее, что отчетливо видно на сводной огибающей в диапазоне времен пробега  $t_c-t_0$  от 200 до 500 с.

Поскольку свойства сейсмической коды зависят от эффективных параметров среды (добротности) всего региона и от средних по всем направлениям характеристик излучения, сам процесс формирования коды обеспечивает высокую устойчивость ее характеристик и делает ее идеальной нормировочной характеристикой. Величина отношения амплитуды поперечной волны  $A_s$  к амплитуде коды  $A_c$  в фиксированный момент времени ( $t_c-t_0$ ) использована для изучения среднего затухания от очаговых зон до станции «Судак» и построения калибровочных кривых

$A_S(R)$ . В качестве нормировочной величины принято значение максимальной амплитуды коды  $A_C$  при времени пробега  $(t_c - t_0) = 100$  с. Методика измерения  $A_{100}$  с использованием сводной огибающей коды подробно описана в работе [10].

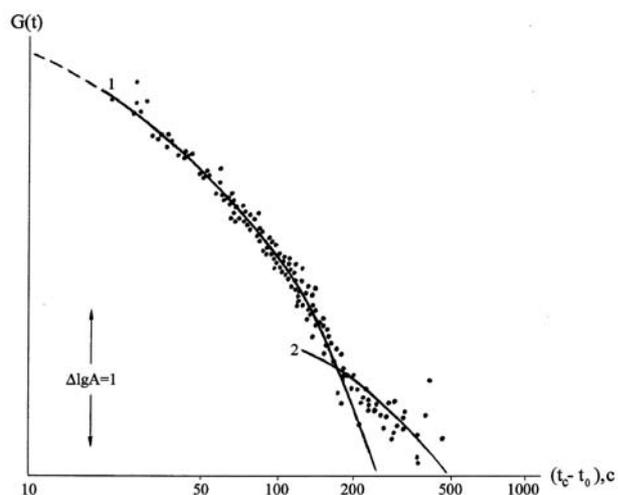


Рис. 6. Сводная огибающая сейсмической коды по записям сейсмической станции «Судак»

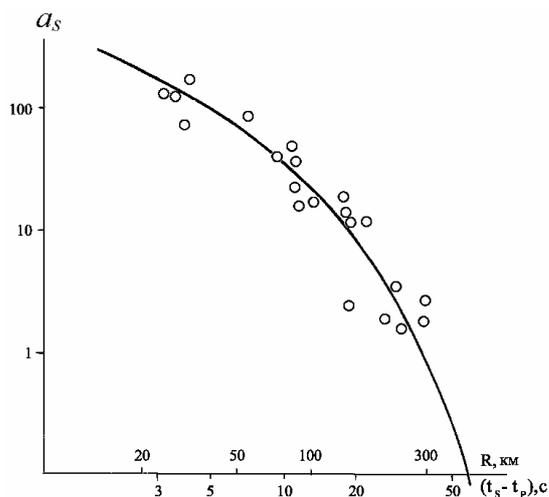


Рис. 7. Затухание с расстоянием амплитуд поперечных волн, нормированных к сейсмической коде, по данным станции «Судак»

Кривая затухания с расстоянием  $R$  нормированных амплитуд поперечных волн  $a_S = A_S/A_C$  (рис. 7) имеет небольшой разброс экспериментальных данных и описывается теоретической зависимостью вида [9]:

$$a(R) \approx R^{-1} \exp\left(-\pi \frac{R}{v \cdot T \cdot Q}\right),$$

где  $T$  – средний период  $S$ -волн;  $Q$  – добротность среды;  $v$  – средняя скорость  $S$ -волн.

Для построения системы энергетической классификации по сейсмической коде необходимо иметь калибровочные кривые, шаг шкалы  $\Delta \lg A / \Delta \lg K$  и привязку калибровочных кривых по энергетическому уровню на основе соответствующих корреляционных соотношений. В качестве калибровочных кривых была использована сводная огибающая коды (рис. 6) и кривая затухания нормированных амплитуд поперечных  $S$ -волн (рис. 7). Шаг шкалы и привязка по энергетическому уровню определены двояко: на основе зависимости  $K_{II} = f(A_{100})$  и  $K_{II} = f(A_{S, \max})$ , с оценкой  $A_S$  на фиксированном расстоянии  $R = 80$  км, соответствующем на графике  $a_S(t_S - t_P)$  времени пробега фиктивной волны  $t_S - t_P = 10$  с. При этом  $K_{II}$  определено как среднее по станциям «Алушта», «Ялта», «Симферополь». Корреляционные соотношения получены методом ортогональной регрессии при высоком коэффициенте корреляции  $\rho \geq 0.9$ :

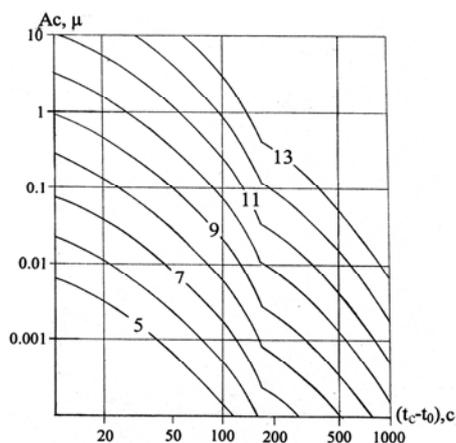
$$K_{II} = (12.09 \pm 0.2) + (1.84 \pm 0.16) \lg A_{100}, \rho = 0.90, (1)$$

$$K_{II} = (9.33 \pm 0.05) + (1.72 \pm 0.05) \lg A_S, \rho = 0.92. (2)$$

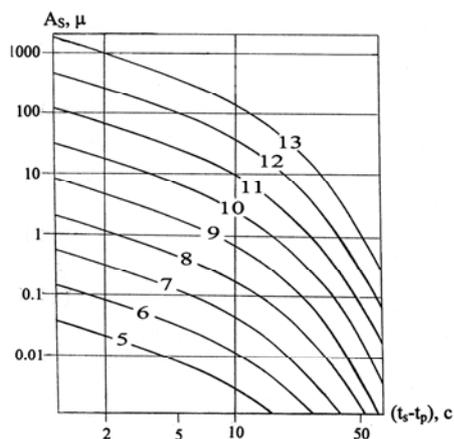
С использованием уравнения (1) и сводной огибающей коды (рис. 6) построена номограмма для определения значений энергетических классов по уровню сейсмической коды (рис. 8), что очень надежно даже по од-

ной станции, если сейсмическая кода сформирована для всех энергетических и пространственных интервалов значений. Однако ее применение ограничено для слабых удаленных землетрясений, при которых сейсмическая кода плохо выражена на фоне помех.

Определение энергетических классов по другой номограмме (рис. 9), построенной с помощью уравнения (2) и калибровочной кривой  $a_S(R)$  (рис. 7), таких ограничений не имеет, т. к. амплитуды  $S$ -волны – практически всегда измеряемые величины. В то же время известно, что энергия регистрируемой  $S$ -волны существенно зависит от направленности излучения, свойств очага и среды, по которой волна распространяется, что делает калибровку землетрясений по номограммам для  $S$ -волн с использованием только одной станции менее устойчивой, чем по уровню сейсмической коды.



**Рис. 8.** Номограмма для определения энергетических классов местных землетрясений по амплитудному уровню сейсмической коды на сейсмической станции «Судак»



**Рис. 9.** Номограмма для определения энергетических классов местных землетрясений по амплитудам поперечных S-волн на сейсмической станции «Судак»

Разработанные новые номограммы энергетической классификации с 1998 г. используются в практике интерпретации записей крымских землетрясений [13].

#### Л и т е р а т у р а

1. Пустовитенко А.Н., Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А., Поречнова Е.И., Сыччина З.Н. Крым // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск: ФООП, 2003. – С. 33–41.
2. Свидлова В.А. (отв. сост.) Крым (См. раздел IV (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
3. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Пантелеева Т.А., Плахотный Л.Г., Новик Н.Н. Рой землетрясений 8–10 апреля 1987 г. в северо-западной части Керченского полуострова (Крым) и их возможная геолого-тектоническая интерпретация // Геофизический журнал. – 1988. – № 3. – С. 37–46.
4. Пустовитенко Б.Г. Форосское землетрясение 18 октября 1998 года с  $M_c=4.3$ ;  $I_0=5$  (Крым) (См. раздел II (Макросейсмические обследования) в наст. сб.).
5. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 249 с.
6. Brune J.N. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquake // J. Geophys. Res. – 1970. – V.75. – № 26. – P. 4997–5009.
7. Hanks T.C., Kanamori H. A moment-magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – V.84. – № 35. – P. 2348–2350.
8. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 113–125.
9. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г., Шенгелия И.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. – М.: Наука, 1981. – 140 с.
10. Пустовитенко Б.Г., Раутиан Т.Г. Использование сейсмической коды для определения магнитуд и энергетических классов землетрясений по наблюдениям в Крыму // Интерпретация сейсмических наблюдений. – М.: Наука, 1983. – С. 81–87.
11. Пустовитенко Б.Г., Раутиан Т.Г. Применение сейсмической коды к исследованию затухания сейсмических волн в Крымском регионе // Геофиз. сб. АН УССР. – 1977. – № 78. – С. 3–14.
12. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А. Калибровочные кривые для магнитудной классификации землетрясений ближней зоны Крыма // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН за 1986–1989 гг. Симферополь: ИГ АН Украины. – С. 128–131.
13. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А. Энергетическая классификация местных землетрясений Крыма по записям сейсмической коды на сейсмической станции «Судак» // Сейсмологический бюллетень Украины за 1998 год. – Симферополь: ИГ НАНУ и КЭС, 2000. – С. 81–89.