

**СИЛЬНОЕ КРОНОЦКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 5 ДЕКАБРЯ
1997 ГОДА: ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ, СЕЙСМИЧНОСТЬ
ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ, МЕХАНИЗМ ОЧАГА,
МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ.**

А.А. Гусев* **, В.И. Левина, В.А. Салтыков**, Е.И. Гордеев****

* Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН

** Камчатская опытно-методическая сейсмологической партии ГС РАН

**LARGE KRONOTSKY EARTHQUAKE OF DEC.5, 1997: BASIC
DATA, SEISMICITY OF THE EPICENTRAL ZONE, SOURCE
MECHANISM, MACROSEISMIC EFFECTS.**

A. Gusev, V. Levina, V. Saltykov, E. Gordeev

Аннотация. Сильное мелкофокусное Кроноцкое землетрясение ($M_w = 7,9$) произошло 5 декабря 1997 года у Тихоокеанского побережья Камчатки вблизи Кроноцкого полуострова. Землетрясению предшествовал рой форшоков, начавшийся за трое суток до основного толчка вблизи инструментального эпицентра. Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками, наиболее сильный из них имел магнитуду $M_s = 6,7$. По афтершокам первых суток была определена очаговая зона протяженностью около 200 км, ориентированная вдоль структур океанической дуги. Инструментальный эпицентр расположен в северо-восточной части очаговой зоны. По вертикальным разрезам афтершоковых землетрясений определено наиболее вероятное глубинное положение очага, в интервале 10 – 50 км. Тензор сейсмического момента имеет ориентацию, типичную для землетрясений зоны субдукции. Макросейсмический эффект землетрясения несколько ниже, чем у других Камчатских землетрясений такой же силы. Изосейсты балльности выгнаты вдоль очага и вдоль структур островной дуги. Наблюдается ярко выраженная асимметрия изосейст относительно центра очага, с направленностью излучения к ЮЗ (в направлении г. Петропавловска-Камчатского).

Abstract. The large shallow Kronotsky earthquake ($M_w=7.9$) occurred on Dec. 5, 1997 at the pacific coast of Kamchatka near to Kronotsky promontory. The earthquake was preceded by a fore-shock swarm that began three days in advance of the main shock, in the vicinity of the instrumental epicenter. The earthquake was followed by numerous aftershocks, of those, the largest was of $M_S=6.7$. On the basis of aftershocks of the first 24 hours, the source zone was outlined, of apprx. 200 km elongation, oriented along the island arc structure. The instrumental epicenter is located at its NE tip. Vertical cross-sections of aftershock hypocenters define the approximate vertical extent of the source as 10-50 km. The orientation of seismic moment tensor is typical for a large shallow subduction earthquake. The macroseismic effects are somewhat lower that expected for Kamchatka earthquakes of similar magnitude. Elongated isoseismals are stretched along island arc structure. A prominent NE-SW asymmetry of isoseismals is observed, with enhanced seismic energy radiation to SW azimuths (to Petropavlovsk-Kamchatski).

5 декабря 1997 года в 11 ч, 26 мин, всемирного времени (местное 23 ч 26 мин) у Тихоокеанского побережья Камчатки вблизи Кроноцкого полуострова произошло самое сильное в этом районе за время детальных сейсмологических наблюдений землетрясение с магнитудой $M_w = 7,9$. Сводка определений координат землетрясения различными сейсмологическими службами мира приведена в табл. 1. На побережье Камчатки землетрясение ощущалось силой до 7 баллов.

Таблица 1.
Сводка определений параметров очага Кроноцкого землетрясения
05.12.1997.

Время в очаге	Координаты гипоцентра			Энергетические оценки	Источник
	φ°, N	λ°, N	H, км		
11 26 43.6	54.95	163.23	4	$K_S = 14.9; M_C = 7.7$	КОМСП ГС РАН
11 26 54.8	54.88	161.95	33	$MPSP=7.0; MPLP=7.2;$ $MS=7.9$	ЦОМЭ ОИФЗ РАН
11 26 54.7	54.84	162.03	33	$m_b = 6.3; M_S = 7.6; M_w = 7.7$	NEIC
11 27 21.1	54.08	162.29	41	$M_w(HRV) = 7.9$	Harvard CMT *

* - Время и координаты центра тяжести излучателя

Сейсмичность района очага.

Очаг Кроноцкого землетрясения возник под континентальным склоном Камчатки у побережья Кроноцкого полуострова. На рис. 1 показано

расположение исследуемого района на Камчатке (врезка А) и сеть сейсмических станций КОМСП ГС РАН, по данным которых производилось оперативное определение гипоцентров землетрясений, во время активизации очага Кроноцкого землетрясения. Представительным нижним уровнем в оперативном каталоге землетрясений Камчатки и Командорских островов в выделенном районе является $K_S = 8,5$. В связи со значительным усилением сейсмической активности в исследуемом районе выделение слабых толчков стало затруднительным, и уровень надежной регистрации в первые дни декабря 1997 года понизился до значения $K_S = 10,5$. Весь проводимый далее обзор сейсмичности выполнен по данным оперативного каталога и поэтому имеет предварительный характер.

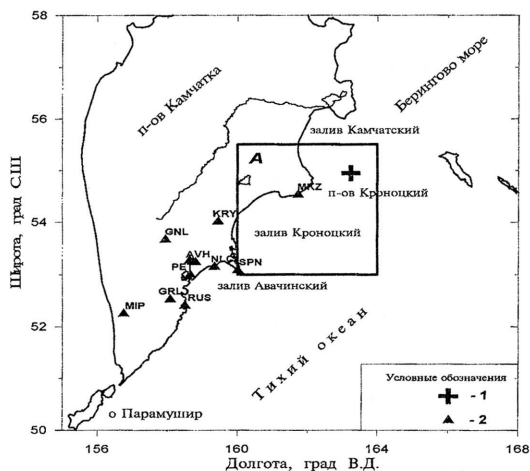


Рис.1. Карта сейсмических станций.

1 – положение эпицентра очага Кроноцкого землетрясения; 2 – сейсмические станции: МІР – малая Ипелька; GRL – Горелый; RUS – Русская; PET – Петропавловск; AVH – Группа сейсмических станций на вулкане Авача; NLC – Налычево; SPN – мыс Шипунский; GNL – Ганалы; KRY – в. Карымский; MKZ – мыс Козлова.

Fig 1. Seismic station. 1 - epicenter of Kronotski earthquake. 2 - seismic station: MIP - malaya Ipelka; GRL - Gorely; RUS - Russkaya; PET - Petropavlovsk; AVH - Avacha volcano subgroup; NLC - Nalychevo; SPN - cape Shipunski; GNL - Ganaly; KRY - Karymski volcano; MKZ - cape Kozlova.

На рис 2-3 представлены карта эпицентров землетрясений и графики сейсмической активности за период с января по ноябрь 1997 года (на этом рисунке и на всех последующих инструментальный эпицентр Кроноцкого землетрясения нанесен жирным крестом).

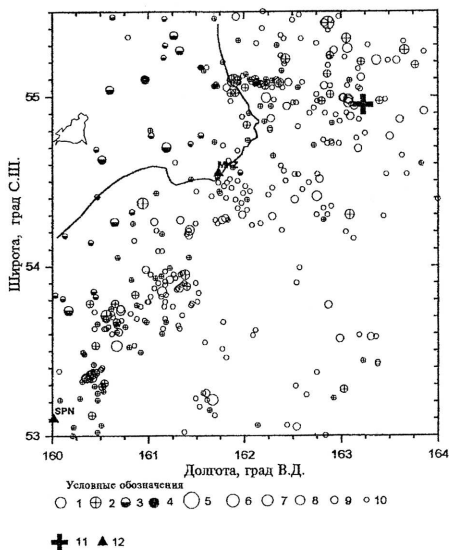


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений из района А (рис.1) с $K_S \geq 8.5$ за январь – ноябрь 1997 года.

1 – 4 глубина очага: 0-35, 36 – 70, 71 – 150, 150 км, соответственно; 5 – 10 эпицентры землетрясений: $K_S = 14$ (13,5 – 14,4), $K_S = 13$ (12,5 – 13,4), $K_S = 12$ (11,5 – 12,4), $K_S = 11$ (10,5 – 11,4), $K_S = 10$ (9,5 – 10,4), $K_S = 9$ (8,5 – 9,4); 11 – эпицентр Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г; 12 – сейсмические станции.

Fig 2. Epicenters of small earthquakes in A zone of fig 1, magnitude $K_S > 8.5$; period Jan-Nov 1997. 1-4 - focal depth 0-35, 35-70, 70-150 and 150+, km; 5-10 - « K_S » magnitudes 14, 13, 12, 11, 10 and 9; 11 - epicenter of Kronotsky earthquake; 12 - seismic stations.

Следует обратить внимание на рой землетрясений (рис. 3), произошедший 9 – 28 февраля к западу от инструментального эпицентра Кроноцкого землетрясения. Наиболее сильное землетрясение в рое имело $K_S = 12,9$ и произошло 9 февраля. С 3 декабря в районе инструментального эпицентра

будущего сильного землетрясения возникла вспышка активности землетрясений с $K_S = 7 - 12$, имевшая характер форшоков. Всего произошло 162 форшока, из них 44 землетрясения с $K_S \geq 10.5$.

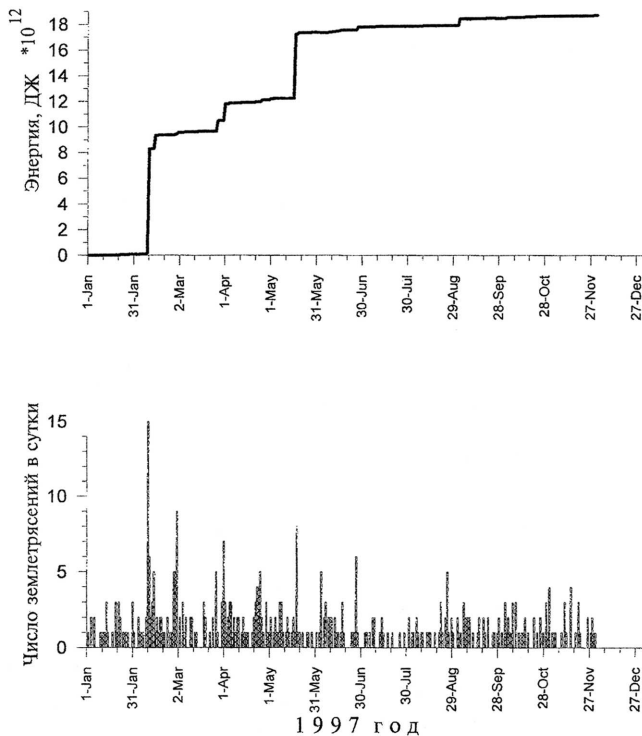


Рис. 3. Графики сейсмической активности района за январь – ноябрь 1997 г.
($K_S \geq 8,5$)

Fig 3. Small event number accumulation plots, Jan-Nov 1997, $K_S \geq 9$.

На рис. 4 приведена карта эпицентров форшоков за 3 – 5 декабря. Различными значками обозначены различные временные интервалы. Видно, что за шесть часов до основного события (крестики) разброс среди эпицентров значительно уменьшился и они приблизились к месту будущего сильного землетрясения.

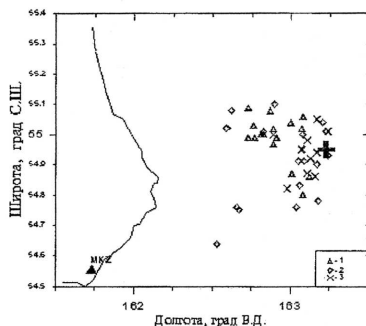


Рис. 4. Карта эпицентров форшоковых землетрясений с $K_S \geq 10,5$.

1 – землетрясения за 3 – 4 декабря; 2 – землетрясения за 5 декабря 0 – 5 час; 3 – землетрясения 5 декабря 6 – 11 час.

Fig 4. Epicenters of fore shocks of $K_S > 10.5$. 1 - Dec.3-Dec.4 period; 2 - Dec.5, 00 to 05 hour period; 3 - Dec.5, 06-11 hour period.

За период времени с 1 декабря по 5 января 1998 года в рамках карты (рис. 2) зарегистрировано 2087 толчков с $K_S = 6 - 14$, из них 464 с $K_S \geq 10.5$. Данные о наиболее сильных афтершоках приведены в таблице 2. На рис. 5 представлены графики сейсмической активности в декабре 1997 г. В декабре произошел необычайный всплеск активности: число землетрясений в сутки за этот период более чем на порядок превышало ежесуточное число землетрясений в течение года, а сейсмическая энергия, выделившаяся за этот месяц, превышает показания предыдущих одиннадцати месяцев на два порядка. Карты эпицентров событий с $K_S \geq 10.5$ представлены на рис. 6-7.

Таблица 2.

Сведения о наиболее сильных афтершоках с $K_S \geq 10.5$

Дата	Время			Координаты		H, км	Ks	M (ЦОМЭ)			M (NEIC)		
	Ч	Мин	с	5	6			7	8	9	10	11	12
19971205	11	35	2.0	53.87	161.56	33	*	6.1				5.7	
19971205	11	37	9.3	54.48	162.31	33	*	6.0				5.6	
19971205	11	40	19.6	53.87	161.48	33	*	5.1				4.9	
19971205	11	41	11.1	53.94	161.89	14	*	5.3				5.1	
19971205	11	42	52.8	53.80	161.49	33	*	5.5				5.4	
19971205	11	45	25.6	54.75	162.38	16	*	5.6				5.3	
19971205	11	48	42.3	54.50	162.31	43	*	5.9				5.4	
19971205	11	51	10.8	54.25	161.62	31	*	5.4				5.1	

19971205	11	52	17.0	53.92	161.55	33	*	5.1				4.9	
19971205	11	53	7.1	54.27	162.33	34	12.5	5.2				5.1	
19971205	11	55	55.4	53.58	160.49	11	12.5	5.0				5.1	
19971205	12	10	30.2	54.37	162.44	28	*	5.2				5.0	
19971205	12	18	33.9	54.67	162.14	33	*	5.1				4.6	
19971205	12	22	35.5	53.93	161.44	33	*	5.3				5.0	
19971205	12	34	29.1	53.89	161.44	34	12.7	5.1				4.8	
19971205	13	28	50.4	53.80	161.20	38	12.7	5.0				4.9	
19971205	14	07	57.4	54.55	161.75	22	*	5.1				4.9	
19971205	14	23	0.1	53.69	161.75	5	12.9	5.5				5.1	
19971205	14	46	49.5	53.73	161.79	21	12.7	5.3				5.0	
19971205	15	33	33.1	54.06	161.01	31	12.5	5.0				4.8	
19971205	16	27	11.2	53.75	160.58	61	12.9	5.5				5.2	
19971205	18	48	17.2	53.60	161.84	0	14.1	6.4	6.7	6.5		6.2	6.5
19971205	19	4	2.9	53.79	161.49	6	13.1	5.9				5.5	
19971205	20	30	49.6	53.64	162.04	8	13.0	5.4				5.1	
19971205	20	33	6.8	53.73	161.08	5	12.5	5.3				4.9	
19971205	21	24	21.4	53.81	161.44	8	13.0	5.5				5.2	5.3
19971205	23	57	27.3	53.51	160.91	54	13.0	5.2	5.3			5.1	5.0
19971206	0	25	5.5	53.69	161.49	10	13.2	5.5				5.3	5.5
19971206	5	9	52.2	54.54	162.23	13	12.7	5.5				5.2	4.7
19971206	6	37	4.8	54.70	163.03	24	12.7	5.6				5.2	
19971206	6	38	0.3	54.64	161.51	32	*	5.7				5.7	5.0
19971206	10	5	3.9	53.90	162.15	33	13.2	5.7				5.4	5.4
19971206	10	59	7.8	53.87	161.99	10	13.7	6.0		6.3		5.7	5.8
19971206	12	37	24.2	54.47	162.19	11	12.9	5.8				5.5	5.6
19971206	19	47	41.0	54.04	161.03	11	12.9	5.6				5.5	4.7
19971207	8	10	55.3	54.25	162.69	21	12.6	5.5				5.3	5.1
19971207	13	14	44.7	53.78	161.77	32	12.6	5.3				5.1	
19971207	17	56	17.4	54.51	163.29	16	14.0	6.2	6.6	6.4		5.6	6.0
19971207	23	5	48.8	53.70	161.97	16	12.9	5.6				5.3	5.4
19971208	14	38	3.6	53.67	160.86	11	12.5	5.2				5.0	
19971208	18	17	44.9	53.63	161.01	21	12.9	5.3				5.1	4.6
19971208	21	6	11.5	53.71	161.92	10	12.9	5.9				5.4	5.2
19971208	22	19	52.5	53.69	162.01	10	13.2	5.9				5.5	5.0
19971209	0	7	5.2	53.72	161.55	21	12.7	5.1				4.4	
19971209	13	2	45.4	53.95	161.78	5	13.2	5.7				5.4	4.8
19971210	8	8	15.5	54.67	163.14	10	12.8	5.3				5.2	4.9
19971211	4	0	31.4	54.58	163.01	5	12.8	5.2	5.0			4.9	5.0
19971213	5	48	48.0	54.74	162.52	46	12.8					4.9	4.1
19971214	4	10	57.3	53.84	161.55	4	12.6	5.4	4.8			4.9	4.7
19971226	4	50	44.2	53.78	161.68	3	12.9	5.4				5.1	4.5
19971226	5	2	29.4	53.72	161.80	3	12.9	5.1	5.2			5.0	4.6
19980101	20	3	57.1	53.95	162.04	5	12.9						

Примечание: Символом * обозначены землетрясения, определения которых взяты из каталога ЦОМЭ ОИФЗ, так как из-за большого количества следующих друг за другом землетрясений координаты этих событий в оперативном режиме определить не удалось.

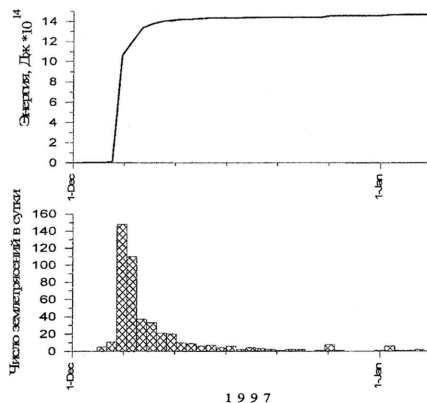


Рис. 5. Графики сейсмической активности района за декабрь 1997 г. ($K_S \geq 10,5$)
 Fig 5. Small event number accumulation plots, Dec 1997, $K_S \geq 10.5$.

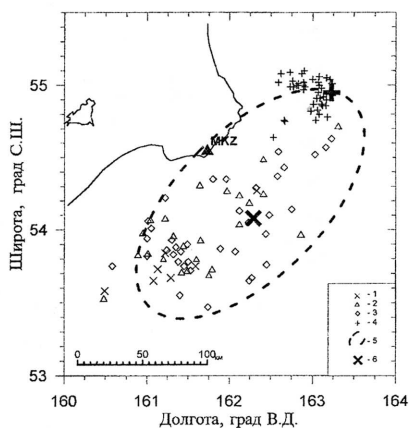


Рис. 6. Карта эпицентров афтершоков первых семи часов активности 5 декабря ($K_S \geq 10,5$). 1 - с 11 ч 27 мин. по 12 ч 26 мин.; 2 – с 12 ч 27 мин по 15 ч 26 мин; 3 – с 15 ч 27 мин по 18 ч 26 мин; 4 – форшоки; 5 – очаговая зона землетрясения; 6 – центр тяжести сейсмического момента главного землетрясения 5 декабря по HARVARD CMT.

Fig 6. Epicenters of aftershocks of the first seven hours after main shock ($K_S \geq 10.5$), for periods: 1 - 11^H27^M to 12^H26^M, Dec.05; 2 - 12^H27^M to 15^H26^M, Dec.05; 3 - 15^H27^M to 18^H26^M, Dec.05; 4 - fore shocks; 5 - main shock source zone outline; 6 - the centroid of the seismic moment tensor of the main shock, Harvard CMT solution.

По афтершокам первых семи часов была предпринята попытка оценить очаговую область сильного землетрясения. На рис. 6 различными значками представлены афтершоки первых семи часов. Из рисунка видно, что разрыв в первый же час распространился в юго-западном направлении, обозначив практически всю очаговую область (косые кресты). Затем возникла активизация поперечной структуры ЗСЗ – ВЮВ простирания в юго-западной части очага, а уже к седьмому часу снова активизировался северо-восточный край. На том же рисунке для наглядности приведены эпицентры форшоков. На рис. 6 показано также положение центра тяжести сейсмического момента основного события по Harvard CMT, которое хорошо согласуется с центром очаговой зоны.

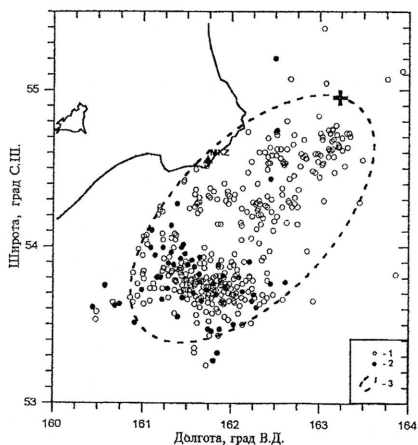


Рис. 7. Карта эпицентров афтершоков за период 5 декабря – 5 января ($K_S \geq 10.5$). 1 – эпицентры афтершоков ($H \leq 35$ км); 2 – эпицентры афтершоков ($35 \text{ км} < H \leq 70$ км); 3 – очаговая область Кроноцкого землетрясения.

Fig 7. Epicenters of aftershocks of Dec.05 1997 - Jan.05 1998 period ($K_S \geq 10.5$). 1 - epicenters, $H \leq 35$, km; 2 - same, $35 < H \leq 70$, km; 3 - main shock source zone contour.

На рис. 7 приведены эпицентры афтершоков, произошедших в течение месяца после главного события. Видно, что очаговая зона, оцененная по афтершокам первых семи часов, хорошо соответствует последующей активности очага. Хорошо видно относительно низкое заполнение эпицентрами центральной части очаговой зоны, что может указывать на то, что движения в очаге проходили вдоль структур двух направлений: СВ-ЮЗ и СЗ-ЮВ. Структура СЗ-ЮВ

направления возникла в южной оконечности очаговой зоны. В центральной части очаговой области число афтершоков невелико, и эта черта имеет место и для зарегистрированных землетрясений с $K_S < 10.5$. В целом, судя по афтершокам, очаговая область Кроноцкого землетрясения расположена напротив Кроноцкого полуострова, имеет вид вытянутого эллипса, с ориентировкой ЮВ-СЗ (азимут около 45°). Характерные размеры очаговой зоны в плане 200×110 км. Центр эллипса имеет координаты $54,18^\circ$ N и $162,22^\circ$ E. Инструментальный эпицентр находится на северо-восточном краю зоны афтершоков. Форшоковый рой близок к инструментальному эпицентру.

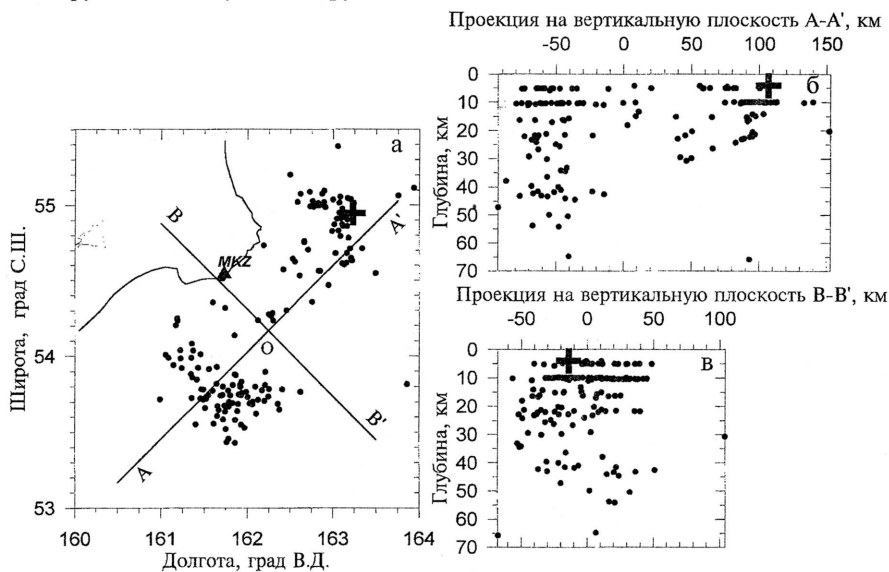


Рис. 8. Карта эпицентров (а) и вертикальные разрезы (б, в) землетрясений, у которых на станции МКЗ записаны вступления Р и S – волн, за период с 5 декабря по 5 января ($K_S \geq 10,5$). Точка О на карте соответствует центру эллипса очаговой области, линии А-А' и В-В' – осям эллипса.

Fig 8. Epicenter map (а) and vertical cross-sections (б, в) of aftershocks with readable P and S arrivals at the nearest MKZ station, Dec.5 1997 to Jan.5 1998, $K_S \geq 10.5$. O - center of source area; AA' and BB' lines: axes of the ellipse that approximates the source area.

В связи с низкой точностью определения глубин землетрясений по оперативным данным надежно оценить вертикальную структуру очаговой

области затруднительно. Для приблизительной оценки глубин очаговой области из оперативного каталога афтершоков были отобраны такие землетрясения, у которых были записаны вступления Р и S-волн на ближайшей к очагу станции мыс Козлова (МКЗ). Определения положения гипоцентров этих землетрясений относительно надежны, так как расстояние от этой станции до эпицентров не превышает 150 км. Карта эпицентров и вертикальные разрезы на линии А-А' и В-В' для землетрясений с $K_S \geq 10.5$ представлены на рис. 8 (а-в). Основываясь на пространственное распределение гипоцентров афтершоков, вертикальное расположение очаговой области можно оценить в интервале глубин 5 – 50 км. Эти оценки подтверждаются и вертикальным распределением более слабых землетрясений, которое в данной работе не приводится.

Механизм очага.

На рис. 9 и в табл. 3 представлены длиннопериодные механизмы очагов основного толчка и пяти сильнейших афтершоков, определенные группой А. Дзевонского в Гарвардском университете (Harvard CMT solution).

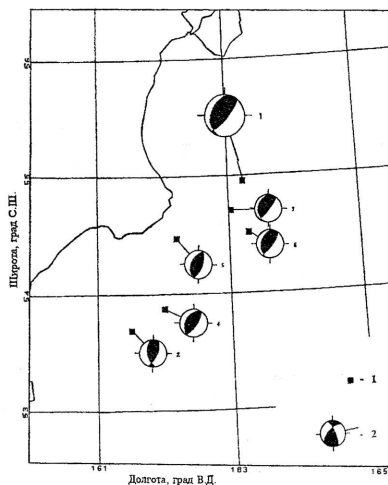


Рис. 9. Карта механизмов сильнейших афтершоков.

Условные обозначения: 1 – эпицентры землетрясений (координаты эпицентров взяты из каталога КОМСЦ); 2 – диаграммы механизмов.

Fig 9. Fault plane solutions (Harvard CMT) of main shock and largest aftershocks. 1 - epicenters (local network location); 2 - fault plane diagram.

Данные о механизмах очагов сильнейших афтершоков по Harvard CMT.

№	Дата		Время		Координаты		H, км	M _w	Оси главных напряжений						Нормальные плоскости											
	М	д	Ч	М	φ°	λ°			T		N		P		NP1		NP2									
									PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	STK	DP	STK	DP	STK	DP	STK	DP	STK	DP
1	12	05	11	26	54.08	162.29	41	7.9	64	326	8	218	24	125	198	22	68	41	70	99						
*									7.7	57	313	2	220	33	129	12	82	41	78	92						
2	12	06	00	25	53.79	161.68	15	5.8	70	349	19	189	6	97	167	42	61	23	54	114						
3	12	06	06	38	54.91	161.64	15	5.7	58	316	7	215	31	121	190	15	63	37	77	97						
4	12	06	10	59	53.86	162.44	22	6.1	74	316	4	213	16	122	207	29	83	35	61	94						
5	12	06	12	37	54.91	162.46	24	5.9	78	279	3	21	12	111	205	33	95	19	57	87						
6	12	07	17	56	54.49	163.43	15	6.1	66	320	8	213	23	119	194	23	70	36	68	98						

Примечание.

1 - Значения T₀, φ, λ и H относятся в этой таблице не к гипоцентру, а к моменту времени и координатам, описывающим центра тяжести сейсмического момента, то есть длиннопериодного излучателя сейсмических волн.

2 - T – ось растяжения, N – ось промежуточного напряжения, P – ось сжатия, PL, AZM – угол погружения, азимут осей T, P, N; STK – азимут простирания, DP – угол падения, SLIP – угол скольжения.

* - приведены данные NEIC GS

Механизм основного толчка может интерпретироваться либо как типичный «субдукционный» взброс с наклоном сместителя 20° , либо как близвертикальный взброс по сопряженному разлому, с подъёмом океанического блока. В обоих случаях (АзNP1, АзNP2) простирание разрыва СВ – ЮЗ неплохо согласуется и с ориентировкой длинной оси облака афтершоков, и с ориентировкой структуры островной дуги. В силу низкой точности предварительных оценок глубин афтершоков, выбор из этих вариантов пока невозможен. Механизмы афтершоков весьма близки к механизму основного толчка, что скорее всего, указывает на единый характер геомеханического процесса по площади очага. Глубины центра тяжести сейсмического момента (40 км для основного толчка и 15-30 км для афтершоков) согласуются с диапазоном глубин основной массы афтершоков (10-50 км).

Сводка макросейсмических данных и ее анализ.

Сразу после землетрясения был начат сбор макросейсмических данных. 9 декабря 1997 г. был проведен облет на вертолете эпицентральной зоны Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997г. Оценки макросейсмической интенсивности в баллах, полученные в облете, а также полученные из иных источников, сведены в табл. 4. Там же даны значения интенсивности для пунктов вне эпицентральной зоны. Описание проявлений землетрясения в различных пунктах на территории Камчатки даны в приложении.

Таблица 4.

Сводка оценок макросейсмической интенсивности

№	Название пункта	Широта	Долгота	Балл	Расстояние до главного толчка, км	Расстояние до центра очаговой зоны, км
1	2	3	4	5	6	7
1	мыс Козлова	54.56	161.73	6-7	105	62
2	мыс Шипунский	53.11	160.01	6-7	290	171
3	п. Кроноки	54.60	161.13	6-7	140	84
4	маяк Кроноцкий то же для среднего грунта	54.75	162.10	6-7 7-8	75	76
5	п. Жупаново	53.68	159.85	6	260	147
6	п. Заозерный	53.04	158.74	5-6	360	244
7	г. Петропавловск	53.02	158.65	5-6	365	248
8	п. Рыбачий	52.92	158.43	5-6	385	269

9	г. Елизово	53.19	158.38	5	370	256
10	п. Крутоберегово	56.26	162.71	5	152	249
11	п. Паратунка	52.97	158.25	5	390	276
12	п. Усть-Камчатск	56.22	162.47	5	155	243
13	база Родниковая	52.65	158.24	5	410	293
14	Маяк Круглый	52.07	158.30	5	452	336
15	Мыс Африка	56.17	163.22	5	130	197
16	г. Ключи	56.31	160.85	4	210	261
17	п. Козыревск	56.06	159.87	4	245	259
18	п. Мильково	54.70	158.63	4	295	231
19	п. Никольское	55.20	165.98	4	175	286
20	г. Северо-Курильск	50.67	156.10	4		
21	п. Коряки	53.28	158.18	3-4	355	266
22	Гмс. Водопадная	51.81	158.08	3-4	482	370
23	с-ст. Апача	52.93	157.13	3	450	341
24	п. Начики	53.12	157.74	3	412	301
25	п. Озерновский	51.49	156.50	3	590	466
26	п. Паужетка	51.47	156.81	3	575	453
27	п. Тигиль	57.77	158.66	3	425	461
28	п. Эссо	55.93	158.70	3	310	297
29	П. Соболево	54.27	155.92	3	487	414

Для пункта Кроноцкий маяк, ближайшего к эпицентру, дано также значение интенсивности, приведенное к среднему грунту. Поясним, что приведение к среднему грунту - необходимый элемент сводного анализа макросейсмических данных. Не учет фактора грунта может затруднить понимание закономерностей возбуждения и распространения разрушительных колебаний. В конкретном случае толчка 5 декабря, неисправленная за грунт балльность вблизи эпицентральной зоны очага с магнитудой 7,7 неправдоподобно низка (6-7 баллов). Для приведения к среднему грунту следует прибавить 1 балл. Полученное в результате значение интенсивности 7-8 баллов в эпицентральной зоне несколько более приемлемо, но все же должно рассматриваться как аномально низкое.

Материалы табл. 4 использованы для построения карты изосейст. (рис.10) Изосейсты на карте сильно сглажены, объем данных мал для более детальной рисовки. Вытянутость изосейст вдоль очага и вдоль структур островной дуги, (направление СВ-ЮЗ) является типичным для камчатских землетрясений. Дополнительно к эффекту вытянутости, обращает на себя внимание асимметрия изосейст относительно центра очага. Они вытянуты к ЮЗ, что указывает на

вероятный эффект направленности излучения больших амплитуд колебаний в этом направлении.

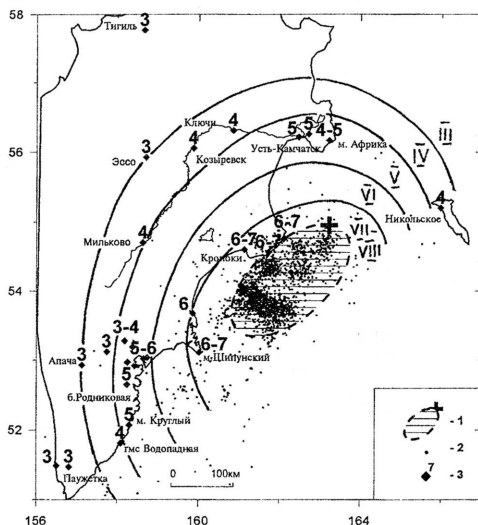


Рис. 10. Карта изосейст Кроноцкого землетрясения.

1 – эпицентр и очаговая зона землетрясения; 2 – эпицентры всех афтершоков за период 5 декабря 1997 г. – 5 января 1998 г.; 3 – населенные пункты и значения интенсивности (баллы).

Fig 10. Isoceismal map of Kronotsky earthquake. 1 - epicenter and source zone of the main shock; 2 - aftershock epicenters, all recorded on Dec.5 1997 to Jan.5 1998; 3 - inhabited locations and MSK intensity values.

Большой интерес представляет сопоставление уровня балльности с магнитудой. Зафиксировав расположение макросейсмического эпицентра в центре зоны афтершоков и приняв глубину точечного источника высокочастотного, «макросейсмически активного» излучения равной средней глубине основной массы афтершоков (30 км), можно рассчитать по баллу значение магнитуды типичного камчатского землетрясения, порождающего такой уровень интенсивности («макросейсмическую магнитуду»).

Опираясь на эмпирическую зависимость балла от расстояния, выведенную для Камчатских землетрясений С.А. Федотовым и Л.С. Шумилиной [1]

$$I = 1,5M - 2.63Lg r - 0,0087 r + 2,5 r$$

Где: I – интенсивность в баллах;

R – расстояние от гипоцентра до пункта наблюдения;

M – магнитуда,

и имея наблюдаемые значения баллов в различных пунктах и расстояния до очага, можно оценить значение макросейсмической магнитуды. В нашем случае оно оказалось равным 7.3 (см. рис. 11.)

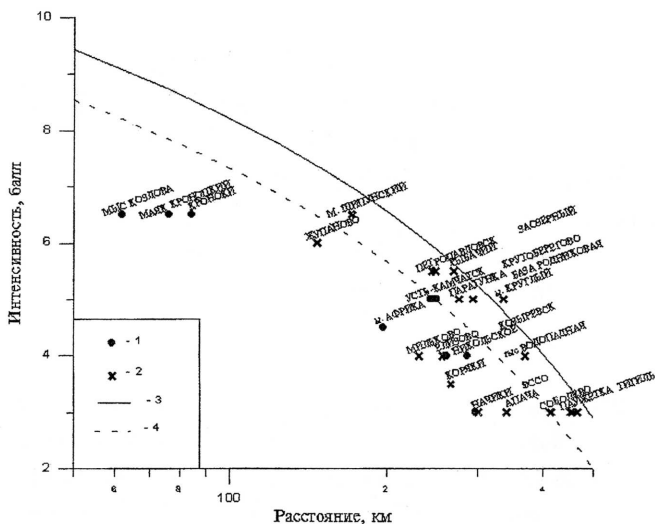


Рис. 11. График спада интенсивности с расстоянием.

1 – пункты, расположенные на северо-восток от малой оси эллипса очаговой зоны; 2 – пункты, расположенные на юго-запад от малой оси эллипса очаговой зоны; 3 – кривая спада балльности для значения магнитуды $M_w=7.9$; 4 – кривая спада балльности для значения магнитуды $M=7.3$

Fig 11. Intensity decay with distance. 1 - locations to NE from line BB on Fig 8; 2 - same, to SW; 3 - average expected decay curve for $M=7.9$; 4 - same, for $M=7.3$.

Значения балльности для пунктов, расположенных на восточном побережье Камчатки южнее очаговой зоны существенно выше значений в симметрично расположенных пунктах севернее очага и в центральной части Камчатки. Интенсивность в юго-западном секторе приближается к теоретическим значениям, рассчитанным по формуле Федотова-Шумилиной для магнитуды 7.9.

Это может говорить о выраженном эффекте направленности излучения на ЮЗ. Масштаб этого эффекта соответствует относительному увеличению амплитуд колебаний в этом секторе примерно в три раза. Это явление требует дальнейшего анализа. Различие макросейсмической магнитуды в $-0,6$ со значением $M_w=7,9$ можно интерпретировать как эффект аномально пониженного высокочастотного излучения очага. Подобная же аномалия наблюдалась для сильного Усть-Камчатского землетрясения 15 декабря 1971г ($M_w=7.7$). В целом, макросейсмические данные находятся в приемлемом согласии с инструментальными.

Землетрясение 5 декабря 1997 г. вызвало небольшое цунами на побережье Кроноцкого полуострова (высота залеска до 1,5 м) и еще более слабое в Кроноцком заливе. Оно зарегистрировано также на Алеутах, в Японии и на Гавайских островах. Магнитуда цунами по К. Абе $M_t = 7.7$

Сильные движения при основном толчке были записаны приборами на мысе Шипунский (максимальное ускорение 160 гал) и на нескольких станциях в районе г. Петропавловска-Камчатского.

Заключение

Землетрясение 5.12. 1997 г. – рядовое событие среди сильных землетрясений Камчатки и Курил. Его очаг в основном заполнил просвет между сопоставимыми по силе очагами события 4.05.1959 г. ($M_w=7.6$) и 15.12.1971 г. ($M_w=7.7$). Размер очага по афтершокам ($\cong 200$ км) и продолжительность очагового процесса (оценивается как $2T \cong 52$ с, где T – временной центр тяжести очага по Harvard CMT) вполне типичны для событий подобной магнитуды. Масштаб цунами также согласуется с магнитудой. Макросейсмический эффект заметно ниже среднего по Федотову-Шумилиной; однако подобная же аномалия имела место для близко расположенного очага 15.12.1971 г. Вполне характерной является и история сейсмичности: форшоки и инструментальный эпицентр возникли на одном из концов длинной оси очага, а развитие очагового процесса шло, по-видимому, односторонним образом (с СВ к ЮЗ), со скоростью порядка 4 км/с ($200\text{км}/52\text{с}$). После землетрясения в силу известного явления пространственного и временного группирования очагов следует считать в течение 1-3 лет повышенной вероятностью сильных ($M > 7,5$) землетрясений в районе Камчатки и Командорских островов. Особенно это существенно для

района Камчатского залива, где, в частности при перераспределении напряжений могла нагружаться перемычка между очагами 1971 и 1997 гг.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам КОМСП, которые быстро и качественно провели оперативную обработку землетрясений, а также О. Донцову, операторам сейсмических станций и маяков и всем другим лицам, предоставившим макросейсмические данные.

Список литературы.

1. Федотов С.А., Шумилина Л.С., 1971, Физика Земли, № 9, с. 3-15

Приложение 1

РЕЗУЛЬТАТЫ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНОГО ($M_w=7.9$) КРОНОЦКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 5 ДЕКАБРЯ 1997г.

А.А.Гусев, В.И.Левина, С.В.Митюшкина.

Макросейсмическое обследование эпицентральной зоны.

9 декабря 1997 г был проведен облет на вертолете эпицентральной зоны Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997г. Ниже описаны результаты визуальных наблюдений с воздуха и во время посадок и материалы опроса очевидцев. Маршрут полета (посадки): Петропавловск-Камчатский - пос. Жупаново - пос. Кроноки - мыс Козлова - мыс Кроноцкий - Петропавловск-Камчатский.

Озеро Карымское: озеро замерзло частично, вероятно из-за вулканического подогрева; лед тонкий, визуально от 5 до 10 см. Во льду тонкие прямолинейные трещины, (около 6 баллов?)

Метеостанция "Жупаново": во время землетрясения одноэтажный деревянный дом скрипел, кровать подпрыгивала, посуда с места не сдвинулась. С полки упали два баллончика с дезодорантом, на каменной печи в штукатурке появились тонкие трещины. Колебания продолжались около 30 секунд (грунты средние).

Маршрут м/с Жупаново - пос. Кроноки:

Район бывшего Жупановского рыбокомбината - следов цунами нет. В устье одного из ручьев шириной 1-2 м битый лед на участке около 20 м. Вдоль протоки в устье реки некоторые трещины во льду разошлись до полуметра. В целом по лагуне лед не побит, трещины по периферии лагуны. Толщина льда 10-15 см.

Дальше по маршруту вдоль побережья битый лед в устьях ручьев. В нескольких местах трещины длиной десятки метров в замершем пляже. Трещины связаны с усадкой и оседанием песка. Осевшие вниз, к воде блоки замерзшего песка имеют вид чешуй. (Позже оценена толщина замерзшего верхнего слоя песка в 20-50 см). Зияние трещин - первые сантиметры, редко десятки см. Заметных следов заплеска на пляже нет. На фазе морской террасы, имеющем характер осыпи, непосредственно над пляжем в двух местах небольшие (до 3-5 м по фронту) свежие оползни. От устья р.Кроноцкой и далее на север система трещин в верхней части пляжа видна непрерывно и везде, где есть пляж.

Сейсмостанция Кроноки (150 м вверх от устья на правом борту долины р. Татьяна): во время сильных колебаний спавшие проснулись, в панике выбежали на улицу. Земля колыхалась. Деревянный дом скрипел, открывались двери, дребезжали стекла окон, висячие предметы сильно раскачивались. Попадали предметы с полок. Сильно сдвигались с места легкие, тяжелые и очень тяжелые предметы. В доме появились трещины штукатурки у косяков, местами порваны обои. Под домом произошел порыв водопровода. Печей, труб нет. В дизельной (кладка из мелких блоков) упал с верстака сверлильный станок, образовались трещины в перегородках и по периметру двери. Образовались многочисленные трещины шириной до 1 см в мерзлом верхнем слое земли и шириной до 5 см вдоль берега в мерзлом песке на верхнем краю пляжа. Следов высокого заплеска не видно, хотя погода стояла ясная, снег после 5.12.1997 не выпадал. Примечание: особые гидрогеологические условия привели к формированию мощных просачиваний воды в районе Кронок; визуально они выражены в виде большого числа свежобразованных наледей (морозная погода длилась уже две-три недели).

База лесников в пос. Кроноки (на полпути между устьями рек Татьяна и Ольга): в поселке три ветхих одноэтажных деревянных дома, один из них полуразрушен. В одном из жилых домов упала труба, в другом, ближайшем к

реке Татьяне, развалилась старая кирпичная печь (связующее - цемент, кирпич - низкого качества), оторвалась от дымохода, часть которого повисла в просевшем перекрытии. Во второй печи, более новой, появились трещины, у основания отвалилась штукатурка.

Приблизительно на полметра выше верхней кромки пляжа волной замыло почву и растительность: принесло песок, гальку, небольшие валуны (до 15 см) и свежие раковины. В замершем верхнем слое пляжа трещина шириной до 5 см. С учетом фактического уровня прилива на момент землетрясения, высота заплеска над уровнем моря составляла около 1 м. Общая оценка интенсивности для пос.Кроноки – 6-7 баллов, грунт средний, обводненный.

Маршрут пос. Кроноки - маяк Кроноцкий:

Юго-западнее мыса Козлова вдоль скалистого побережья в отдельных местах замечены свежие небольшие обвалы камней и в одном месте на борту ущелья ручья вблизи устья - свежая каменная осыпь ограниченного масштаба (до 40м по фронту, около 50 м в длину).

Мыс Козлова: в деревянном одноэтажном доме печь на цементном растворе без повреждений. На мысе свежий небольшой скальный обвал. На пляже - следы заплеска, высотой приблизительно полметра выше заплеска среднего шторма. (Не выше 6-7 баллов. Грунт скальный)

Побережье между м.Козлова и м.Кроноцкий: вдоль побережья едва заметны следы цунами, высота заплеска которого не выше уровня больших штормов. На камнях, выступающих из воды, в ряде мест видны водоросли, которые обычно находятся ниже нижнего уровня отлива. Создается впечатление небольшого (0,5-1 метр) поднятия уровня суши.

Маяк Кроноцкий: в одноэтажном шлакоблочном доме сильно задрожали потолки. В одной из комнат образовалась трещина по стыку перекрытия со стеной. Все выбежали на улицу. Аппарат вращения линзы светового маяка во время сильных колебаний вышел из строя на несколько десятков секунд. Когда колебания пошли на убыль, линза снова начала вращаться. При осмотре никаких трещин в стволе маяка или на отмостке не обнаружили. В доме появились небольшие трещины на стыках между бетонными плитами перекрытия, в небольшом количестве тонкие трещины в перегородках, в основном в углах проемов. В печи на цементной кладке волосные трещины. С внешней стороны в зданиях никаких повреждений не замечено, нет даже тонких трещин в углах

окон, дверных проемов и стен. Качество строительства визуально хорошее. Кирпичных труб нет. Цунами сотрудниками маяка замечено не было, волнение было немного больше обычного. Визуально наблюдаются четкие следы заплеска цунами. С учетом фактического уровня прилива на момент землетрясения, высота заплеска над уровнем моря составляла около 1,5 м. (6-7 баллов. Грунт скальный.).

Макросейсмические проявления землетрясения на территории Камчатской области.

Мыс Шипунский: Землетрясение ощущали приблизительно 15-25 секунд в одноэтажном деревянном здании и на открытом воздухе. Спавшие люди проснулись, в испуге выходили из домов. В доме скрипели полы и потолки, открывались двери, дребезжала посуда и стекла окон, скрипела мебель, колебались всякие предметы, предметы сдвигались с места, падали предметы на столе и полках, повредилась штукатурка. В районах выхода скальных пород на побережье произошли осыпи. На озере во льду образовались многочисленные трещины (лед толщиной 40 см). Во время землетрясения вода выплескивалась на берег. Был слышен тихий с постепенным нарастанием подземный гул.

Заозерный: Люди в испуге выходили из домов. В крупноблочном здании на пятом этаже скрипели полы, открывались двери, дребезжала посуда, сильно раскачивались всякие предметы, предметы сдвигались с места, падали предметы из посудного шкафа, на потолке повредилась штукатурка.

Петропавловск: Землетрясение ощущали приблизительно 40 секунд в зданиях и на открытом воздухе. В домах скрипели перекрытия и мебель, сильно раскачивались всякие предметы, незакрепленная мебель, открывались двери, дребезжала посуда и стекла окон, падали неустойчивые предметы, расплескалась вода из чашки, стоявшей на столе. В некоторых зданиях образовались трещины в штукатурке и стенах. В гостинице «Петропавловск» заклинило в шахте лифт, в цокольном этаже образовались трещины шириной до 1 см.

П. Рыбачий: Землетрясение ощущали приблизительно 40 секунд. Люди в испуге выходили из домов. Скрипели полы, потолки и мебель; раскачивались всякие предметы. Мебель отодвигалась от стен, открывались дверцы шкафов, падали легкие неустойчивые предметы. Появились трещины в штукатурке.

Крутоберегово: Землетрясение ощущали приблизительно 60-70 секунд на втором этаже деревянного здания. Спавшие проснулись. Скрипели полы и потолки, дребезжали посуда и стекла окон, скрипела мебель, колебались всякие предметы.

Сейсмостанция Крутоберегово: Землетрясение ощущали в течение 50-60 секунд в состоянии покоя в здании на первом этаже. Наблюдалась плавная раскачка, треск здания; скрипели полы и потолки, дребезжала посуда, колебались всякие предметы. Образовались трещины на потолке и стенах шириной 1 мм. Остановился маятник. Сбило зеркало на гальванометре.

Паратунка: Землетрясение ощущали в течение 60 секунд на пятом этаже панельного здания. Спавшие проснулись. Люди в испуге выходили из домов. Скрипели полы и потолки, открывались двери, дребезжала посуда, скрипела мебель, колебались всякие предметы, предметы сдвигались с места, падали предметы на столе и полках.

Усть-Камчатск: Землетрясение ощущали приблизительно 60-70 секунд в блочном здании на втором этаже. Люди в испуге выходили из домов. Скрипели полы и потолки, дребезжала посуда, скрипела мебель, колебались всякие предметы. В штукатурке образовались тонкие трещины. Образовались волосные трещины в стенах.

Вулкан Вилочинский, спортивная база «Родниковая»: Землетрясение ощущали приблизительно 60 секунд в деревянном балке. Балок скрипел, дребезжали стекла и посуда, колебались всякие предметы.

Мыс Сиамо, маяк «Круглый»: Землетрясение ощущали в течение 65 секунд в одноэтажном шлакоблочном здании. Был слышен рокочущий, волнообразный, напоминающий шум камнепада подземный гул, еле слышный вначале (за 5 секунд до землетрясения) и хорошо во время всего землетрясения. В здании скрипели полы и потолки; дребезжала посуда, стекла окон, скрипела мебель, колебались всякие предметы, предметы сдвигались с места. А также повредилась штукатурка: образовались тонкие трещины и обвалы кусков.

Мыс Африка: Землетрясение ощущали, стоя в одноэтажном деревянном здании. Колебались всякие предметы. Люди в испуге покидали помещения.

Козыревск, сейсмостанция: Землетрясение ощущали приблизительно 150 секунд в одноэтажном деревянном здании. Закрывались двери, колебались всякие предметы.

Мицьково: Землетрясение ощущали как продолжительные плавные колебания. Люди в испуге выходили из домов. В здании на третьем этаже дребезжала посуда, колебались всяческие предметы. В одноэтажном деревянном доме дребезжала посуда, колебались всяческие предметы, скрипели двери, покачивалась кровать. Перед землетрясением у опрошенного было ощущение тошноты и боли в груди (у опрошенного больное сердце).

Никольское: Землетрясение ощущали довольно долго в деревянном здании. Все «ходило ходуном»: скрипели полы, дребезжала посуда, колебались всяческие предметы. Коряки, совхоз «Овощевод»: Землетрясение ощущали на третьем этаже блочного дома. Испугались. Дребезжала посуда, колебались всяческие предметы.

ГМС Водопадная: Землетрясение ощущали в течение 60 секунд как колебания в направлении с востока на запад. В одноэтажном здании колебались всяческие предметы.

Начики: Землетрясение ощущали в течение 10 секунд в состоянии покоя в здании на первом этаже. Слегка колебались всяческие предметы.

Эссо: Землетрясение ощущали в течение 70 секунд в состоянии покоя. Дребезжала посуда, колебались всяческие предметы.

Соболево: Землетрясение ощущали как легкое мелкое колебание с направлением с севера на юг в состоянии покоя (сидели) на втором этаже. Было ощущение легкого головокружения. Колебалась люстра.

Тигиль: Качались люстры, позванивала посуда.

Кроме данных облета и опроса местных жителей приводим здесь ощущения, наблюдавшиеся в Тихом океане:

Тихий океан, координаты 54,67°с.ш., 162,45° в.д. плавбаза «Комсомольск-на-Амуре». Судно шло со скоростью 11-12 узлов в спокойном море. Около 23ч 26 м местного времени судно начало испытывать сильную смешанную вибрацию, похожую на слеминг, которая продолжалась примерно одну минуту. Суда, находящиеся на расстоянии 5 - 12 миль, ощущали то же самое. За сутки до этого на судне ощущались неоднократные толчки.