

ТАКОЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 сентября 2001 года с $M=5.2$, $I_0=7$ (Сахалин)**Л.Н. Поплавская¹, Т.А. Фокина², Д.А. Сафонов¹, Т.В. Назорных¹, Ким Чун Ун¹,****Сен Рак Се², Н.А. Урбан²**¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, nagornuh@immgg.ru²Сахалинский филиал ГС РАН, г. Южно-Сахалинск, fokina@seismo.sakhalin.ru

23 июля 2001 г. в 22^h27^m на юге острова Сахалин началась серия ощутимых землетрясений, продолжавшаяся в течение августа–сентября. Серия состояла из двух совокупностей: роя в июле–августе и афтершоков Такойского землетрясения 1 сентября в 13^h08^m с $MLH=5.2$ [1], вызвавшее сотрясения с $I_{\max}=7$ баллов, которое следует считать главным событием изучаемой серии. Согласно [2], это землетрясение записано 455 станциями мира. В табл. 1 приведены его параметры по определениям региональным и международным, а на рис. 1 – сопоставление разных решений эпицентра.

Таблица 1. Основные параметры Такойского землетрясения по данным Сахалинского филиала ГС РАН в сопоставлении с определениями других агентств

№	Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					Магнитуда	Источник	
				φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км			δh , км
1	SHKL	13 08 11.9		47.31		142.62		13		$MLH=5.2/10$, $MSH=4.8/2$, $MPVA=5.6/3$, $K_C=11.4$	[1, 3]
2	SHKL	13 08 11.7		47.27		142.63		7		$MLH=5.2$	[4]
3	MOS	13 08 12.3		47.29		142.55		15		$MS=4.9/33$, $MPSP=5.7/51$	[5]
4	ISC	13 08 12.2	0.59	47.29	0.01	142.57	0.03	13	3.6	$M_s=4.9/113$, $m_b=5.5/154$, $h^*=12\pm 0.9$ по pP	[2]
5	IDC	13 08 12.0		47.29		142.50		0		$m_b=4.9/21$	
6	NEIC	13 08 11.6		47.33		142.55		10		$M_s=4.8/102$, $m_b=5.5/154$	[2]
7	HRVD	13 08 18.2		47.44		142.53		15		$M_w=5.2/36$	[2]
8	JMA	13 08 11.6		47.43	0.04	142.77	0.04	35		$M_{JMA}=5.0$	[2]
9	ВЛ	13 08 11.2		47.37		142.92		27		$M_s=5.1$, $M_b=5.2$	[2]

Анализ рис. 1 показывает, что определения эпицентра главного толчка неплохо согласуются между собой. Как будет показано ниже, наилучшее согласие инструментальных и макросейсмических данных достигается при региональном решении (SHKL).

Анализ рис. 1 показывает, что определения эпицентра главного толчка неплохо согласуются между собой. Как будет показано ниже, наилучшее согласие инструментальных и макросейсмических данных достигается при региональном решении (SHKL).

Инструментальные данные были получены сетью из 12 временных станций «Datamark» и «ДАТ» японского производства, описанной в [6], которые составили почти оптимальную сеть, окружающую очаговую область изучаемых сейсмических событий (см. рис. 2 в [6]).

Расчеты параметров гипоцентров землетрясений роя проводились по программе HYPOINVERSE, в основу которой положен метод инверсий. С помощью этой программы точность определения координат гипоцентров составила в среднем $\delta\varphi=1.3$ км; $\delta\lambda=1.5$ км; $\delta h=2.1$ км [3]. При этом $(\delta\varphi^2 + \delta\lambda^2)^{1/2} = 1.98$ км $\approx \delta h$, что характерно для метода инверсий, используемого в условиях правильно (оптимально) организованной конфигурации сети наблюдающих станций (см., например, [7]).

Как указано в [6], общее число зарегистрированных в рое землетрясений свыше $N_\Sigma=1150$ с $M>1.5$, однако обработаны лишь более сильные из них с $M\geq 3.0$, общее число которых, по данным авторов наст. статьи, составило $N_1=102$ (табл. 2). Сравнение в *ред.* этих данных

с региональным каталогом [1] позволило несколько дополнить табл. 2 ($N_2=138$), из них 20 ощущались в близлежащих населенных пунктах силой от 3 до 7 баллов.



Рис. 1. Сопоставление решения эпицентра Такойского землетрясения 1 сентября 2001 г. по данным цифровых сетей сейсмологических станций СФ ГС РАН с решениями основных международных агентств.

1 – инструментальный эпицентр по двум решениям SHKL [1, 3] и [4]; 2 – инструментальный эпицентр по решениям других международных агентств; 3 – населенный пункт.

Таблица 2. Список землетрясений роя по данным локальной сети цифровых станций и региональной сети аналоговых станций [6] за период с 23 июля по 31 декабря 2001 г. (Составители: Ким Чун Ун (отв. сост.), Сен Рак Се)

№	Дата д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр				h , км	δh , км	M	MLH	K_C	I_{\max} , балл	Источ- ник
			φ°, N	$\delta\varphi$, км	λ°, E	$\delta\lambda$, км							
1	23.07	22 27 26	47.22	0.85	142.69	1.01	12	1	3.3		7.6	3–4	
	23.07	22 28 45.3	47.24	2.0	143.08	2.0	10	3	(3.2)		7.2		[1]
2	23.07	22 52 26	47.22	0.10	142.72	0.98	11	1	3.2		6.7		
	02.08	03 04 02	47.21	1.06	142.70	1.26	10	2	3.4		8.0	3–4	
3	02.08	13 06 09	47.20	1.02	142.71	1.18	10	1	3.8		8.2	4–5	
	02.08	20 31 16.8	47.25	5.0	142.83	13.0	~10	~2	(3.0)		6.8		[1]
4	06.08	04 04 50	47.17	1.36	142.73	1.02	11	1	3.9		7.9	2–3	
	06.08	04 07 34	47.13	1.34	142.68	0.53	2	2	3.3		7.5		
5	06.08	04 53 12	47.17	2.23	142.67	2.34	7	4	4.5	4.7	9.8	5–6	
	06.08	05 22 27	47.18	2.13	142.68	2.86	7	4	3.3		7.4		
	06.08	05 36 51	47.19	2.10	142.68	2.85	7	4	3.4		7.0		
	06.08	10 50 53.3	47.23	2.0	142.72	5.0	8	(1)	(3.1)		7.1		[1]
	07.08	09 32 12.7	47.28	2.0	142.84	2.0	10	3	(2.8)		6.4		
6	07.08	14 46 24	47.24	0.58	142.72	1.24	11	2	3.2		6.4		
7	08.08	01 47 54	47.23	0.47	142.72	1.17	11	1	3.2		6.8		
8	08.08	02 18 12	47.23	0.49	142.72	1.06	11	1	3.0				
9	08.08	03 15 23	47.22	0.51	142.73	2.48	12	2	4.5	4.6		5–6	

№	Дата д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр				h , км	δh , км	M	MLH	K_C	I_{\max} , балл	Источ- ник
			φ°, N	$\delta\varphi$, км	λ°, E	$\delta\lambda$, км							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	08.08	04 23 02	47.25	0.33	142.73	1.26	10	1	3.0				
11	09.08	02 06 14	47.23	0.41	142.71	0.57	10	1	3.0				
12	10.08	00 35 34	47.25	0.39	142.72	0.47	10	1	3.0				
13	11.08	12 25 01	47.24	0.49	142.69	0.57	10	1	3.5		6.7		
	13.08	05 56 56	47.23	0.94	142.65	0.91	12	2	3.2				
	13.08	13 01 10	47.21	0.90	142.71	0.97	11	1	3.3				
	13.08	18 30 06	47.25	1.01	142.66	1.06	12	2	3.0				
14	14.08	04 39 37	47.24	0.49	142.67	0.45	10	1	3.5		7.2		
	15.08	01 28 51	47.22	0.40	142.69	0.49	11	1	3.1		6.7		
	18.08	04 26 08	47.26	1.08	142.66	0.80	9	1	3.4		7.9	2-3	
	18.08	04 27 49	47.25	1.10	142.65	0.84	7	2	3.0				
	18.08	08 09 59	47.26	1.10	142.71	1.05	7	1	3.2		7.1		
	19.08	06 45 33	47.22	0.80	142.70	1.02	8	1	3.0				
	23.08	10 38 11	47.22	0.78	142.68	1.19	10	2	3.3		7.1	2-3	
	24.08	00 10 28	47.22	0.76	142.80	1.12	9	2	3.0				
	24.08	01 51 17	47.22	0.79	142.68	1.08	9	2	3.2				
15	01.09	12 04 46	47.22	1.96	142.62	0.68	4	2	4.2	3.7	9.2	3-4	
	01.09	12 07 45	47.18	2.12	142.60	0.67	5	2	3.4		7.4		
16	01.09	12 15 57	47.21	2.84	142.58	1.36	5	3	4.8	4.1	10.3	5	
	01.09	12 36 02	47.26	0.79	142.65	0.40	8	1.2	3.3				
17	01.09	13 08 12	47.28	1.40	142.63	1.20	7	1	5.2	5.2	11.4	7	
	01.09	13 16 31	47.25	0.84	142.66	0.50	8	1	3.1				
	01.09	13 18 36	47.24	0.79	142.66	0.51	8	1	3.3				
	01.09	13 26 33	47.26	1.24	142.66	0.62	9	1	3.9		8.7		
	01.09	13 28 40	47.24	0.80	142.63	0.34	8	1	3.1				
	01.09	13 30 27	47.25	1.04	142.63	0.84	6	1	3.5		7.6		
	01.09	13 39 01	47.26	0.86	142.66	0.57	9	1	3.0		7.4		
	01.09	13 51 56	47.26	0.82	142.65	0.62	9	1	3.4				
18	01.09	13 52 15	47.23	0.98	142.64	0.86	5	1	4.0	4.3	8.7		
	01.09	13 59 92	47.24	0.78	142.65	0.46	8	1	3.1				
	01.09	14 08 58	47.24	0.73	142.63	0.37	8	1	3.4		7.4		
	01.09	14 13 09	47.25	0.77	142.66	0.47	9	1	3.6		7.9		
	01.09	14 13 25.7	47.34	4.0	142.77	7.0	15	9	(3.6)		8.0		
	01.09	14 14 27	47.23	0.80	142.66	0.48	9	1	3.5				
	01.09	14 31 42	47.25	0.78	142.65	0.40	8	1	3.4		7.8		
	01.09	15 21 53	47.23	0.78	142.66	0.45	9	1	3.2		7.4		
	01.09	15 37 17	47.26	0.77	142.64	0.39	8	1	3.5		7.8		
	01.09	16 09 05	47.24	0.81	142.64	0.61	6	1	3.1		7.0		
	01.09	17 14 54	47.24	0.75	142.69	0.62	7	1	3.4		6.9		
	01.09	17 31 26	47.26	0.79	142.67	0.49	8	1	3.2		7.2		
	01.09	17 47 22	47.23	0.97	142.66	0.57	6	1	3.8		8.5		
	01.09	18 14 46	47.26	0.79	142.65	0.38	8	1	3.3		8.0		
	01.09	18 34 25	47.24	0.76	142.65	0.42	9	1	3.4		7.8		
	01.09	18 56 26	47.24	1.09	142.63	0.77	6	1	3.6		8.1		
	01.09	20 04 30	47.23	1.16	142.59	0.92	6	1	3.5		7.4		
19	01.09	20 40 49	47.26	1.19	142.61	0.77	5	1	4.1	4.1	8.7	4-5	
	01.09	20 48 19	47.26	0.77	142.64	0.37	8	1	3.4				
	01.09	20 52 59	47.21	0.75	142.66	0.54	7	1	3.4		7.3		
	01.09	21 08 50	47.23	0.77	142.65	0.48	7	1	3.2				
	01.09	21 59 04	47.26	1.20	142.62	0.78	6	1	3.4		7.6		
	01.09	22 23 28	47.22	0.75	142.67	0.56	7	1	3.0				
	01.09	22 42 27	47.26	0.81	142.64	0.59	6	1	3.3		7.8		
	01.09	22 58 22.2	47.26	2.0	142.73	2.0	7	1	(3.5)		7.8		
	02.09	02 41 34	47.27	0.90	142.67	0.65	7	1	3.4		8.2		
	02.09	03 19 05	47.27	0.90	142.65	0.60	6	1	3.0				
	02.09	03 30 08	47.22	1.48	142.62	1.05	3	2	3.7		8.7		
20	02.09	04 39 06	47.22	1.96	142.62	1.42	3	3	4.3	4.4	8.7	3	
	02.09	04 50 08	47.23	2.35	142.64	1.78	5	2	3.2		7.6		

[1]

№	Дата д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр				h , км	δh , км	M	MLH	K_C	I_{\max} , балл	Источ- ник
			φ°, N	$\delta\varphi$, км	λ°, E	$\delta\lambda$, км							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
21	02.09	04 58 11	47.26	0.68	142.67	0.52	8	1	3.1				
	02.09	07 32 19	47.21	2.13	142.64	1.65	5	2	3.9		7.7		
	02.09	07 37 14	47.22	0.94	142.65	0.77	6	1	3.0				
	02.09	07 27 18.3	47.30	2.0	142.69	2.0	5	1	(3.1)		7.1		[1]
	02.09	08 47 39	47.23	0.37	142.65	1.86	10	2	4.2	4.0	8.5	3	
	02.09	08 53 21	47.20	0.26	142.61	0.19	4	1	3.3		7.4		
	02.09	10 10 47	47.24	1.02	142.64	0.71	4	1	3.2	3.7	7.7		
	02.09	11 51 38	47.24	0.91	142.66	0.69	6	1	3.1		7.3		
	02.09	21 34 08	47.26	0.87	142.68	0.64	7	1	3.0				
	02.09	23 16 55	47.28	0.87	142.61	0.30	8	1	3.5		8.2		
22	02.09	23 18 29	47.28	0.97	142.61	0.28	7	1	3.0		7.9		
	02.09	23 23 34	47.26	1.00	142.61	0.60	5	1	3.4		7.7		
	03.09	06 39 26	47.24	0.70	142.66	0.55	5	1	3.0				
	03.09	07 51 28	47.27	0.74	142.65	0.48	6	1	4.0		8.8	3	
	03.09	11 31 32.6	47.29	2.0	142.65	2.0	6	1	(3.2)		7.2		[1]
	03.09	16 46 44.3	47.33	2.0	142.69	2.0	5	1	(3.2)		7.2		[1]
	03.09	18 09 38.1	47.32	1.0	142.70	1.0	10	(1)	(3.2)		7.2		[1]
	03.09	19 49 43.7	47.27	2.0	142.72	2.0	6	1	(3.4)		7.7		[1]
	03.09	19 55 22.3	47.26	2.0	142.60	2.0	10	3	(3.3)		7.4		[1]
	04.09	00 26 04.9	47.30	2.0	142.61	2.0	7	3	(3.2)		7.2		[1]
23	04.09	02 51 37	47.27	0.92	142.63	0.48	6	1	3.0		7.4		
	04.09	05 06 49	47.26	1.23	142.62	0.60	6	1	3.0				
	04.09	08 32 49	47.26	0.91	142.66	0.63	7	1	3.3		7.6		
	04.09	08 35 24	47.27	0.72	142.66	0.45	7	1	4.4	4.7	9.8	4-5	
	04.09	08 40 44	47.26	0.95	142.64	0.61	6	1	3.5		7.9		
	04.09	09 10 37.2	47.36	2.0	142.75	2.0	6	1	(3.2)		7.3		[1]
	04.09	10 54 55.9	47.28	2.0	142.65	2.0	9	1	(3.2)		7.3		[1]
	04.09	10 57 17.3	47.31	2.0	142.75	2.0	6	1	(3.0)		6.9		[1]
	04.09	11 02 02	47.27	0.98	142.65	0.64	6	1	3.3		7.7		
	05.09	00 37 36	47.28	0.66	142.64	0.34	8	1	3.0		7.8		
24	05.09	07 31 37.2	47.26	3.0	142.71	3.0	8	1	(3.5)		7.9		[1]
	06.09	01 13 02.5	47.30	1.0	142.74	2.0	10	3	(3.7)		8.4		[1]
	07.09	06 14 12	47.27	0.61	142.62	0.36	6	1	3.1		7.2		
	07.09	06 59 20.3	47.35	2.0	142.79	2.0	6	1	(3.2)		7.2		[1]
	07.09	15 12 56.0	47.23	2.0	142.70	2.0	6	1	(3.3)		7.5		[1]
	07.09	17 04 42.6	47.29	2.0	142.66	7.0	~10	~3	(3.6)		8.0		[1]
	08.09	18 40 18.4	47.31	2.0	142.69	2.0	4	1	(3.3)		7.5		[1]
	09.09	01 42 29.2	47.29	1.0	142.61	1.0	10	2	(3.1)		7.1		[1]
	09.09	02 00 24.9	47.26	2.0	142.73	2.0	6	1	(3.0)		6.9		[1]
	10.09	15 46 34	47.28	0.60	142.62	0.35	6	1	4.3	4.5	9.2	4	
24	10.09	15 53 14	47.27	0.59	142.63	0.33	6	1	3.0		7.1		
	10.09	17 48 41	47.27	0.62	142.61	0.32	5	1	3.2		7.6		
	10.09	20 24 17	47.29	0.60	142.63	0.33	7	1	3.0		7.7		
	10.09	21 14 18	47.28	0.60	142.64	0.32	7	1	3.3		7.6		
	11.09	08 08 05	47.27	0.80	142.66	0.53	6	1	3.7	4.0	8.4	4	
	11.09	10 21 32	47.27	0.78	142.67	0.54	6	1	3.0				
	11.09	11 51 56	47.28	0.77	142.67	0.54	6	1	3.0		7.4		
	11.09	11 54 07	47.27	0.80	142.67	0.56	5	1	3.0				
	13.09	17 13 39.0	47.29	2.0	142.71	2.0	4	1	(3.3)		7.4		[1]
	15.09	01 13 17.6	47.30	2.0	142.75	2.0	5	1	(3.3)		7.5		[1]
24	16.09	11 07 29	47.29	0.81	142.62	0.37	6	1	3.1		7.8	3	
	17.09	18 31 30.8	47.32	2.0	142.68	2.0	5	1	(3.3)		7.4		[1]
	19.09	00 32 30.6	47.35	2.0	142.72	2.0	5	1	(3.3)		7.5		[1]
	19.09	21 29 16	47.29	0.87	142.64	0.43	5	1	3.2		7.6		
	22.09	04 51 44	47.29	0.86	142.66	0.48	4	1	3.3		8.4	4	
	01.10	03 23 24.8	47.32	1.0	142.64	3.0	10	4	(3.6)		8.2		[1]
	04.10	14 17 08.6	47.29	2.0	142.69	9.0	~10	~3	(3.4)		7.7		[1]
	07.10	14 28 40.9	47.29	1.0	142.68	2.0	10	2	(3.4)		7.6		[1]

№	Дата д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр				h , км	δh , км	M	MLH	K_C	I_{\max} , балл	Источ- ник
			φ°, N	$\delta\varphi$, км	λ°, E	$\delta\lambda$, км							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	11.10	06 56 59.8	47.30	2.0	142.73	8.0	~10	~2	(3.3)		7.4		[1]
	26.10	22 48 44.5	47.20	3.0	142.58	3.0	~10	~3	(3.2)		7.2		[1]
	09.12	16 53 29.1	47.30	4.0	142.58	4.0	~10	~3	(3.4)		7.7		[1]
	19.12	21 28 07.9	47.26	4.0	142.51	8.0	~10	~3	(3.3)		7.4		[1]
	21.12	20 00 01.4	47.30	1.0	142.56	5.0	10	6	(3.1)		7.0		[1]

Примечание. В графе 1 пронумерованы события с известным механизмом очага; обозначения глубин в графах 8, 9 соответствуют таковым в региональном каталоге [1]; в графе 10 в скобках даны магнитуды, рассчитанные по уравнению (2); в графе 14 указан источник, из которого добавлены *ред.* толчки роя.

Распределение землетрясений во времени дано на рис. 2, откуда хорошо видны две его части – до главного толчка 1 сентября ($N=37$) и после него ($N=100$).

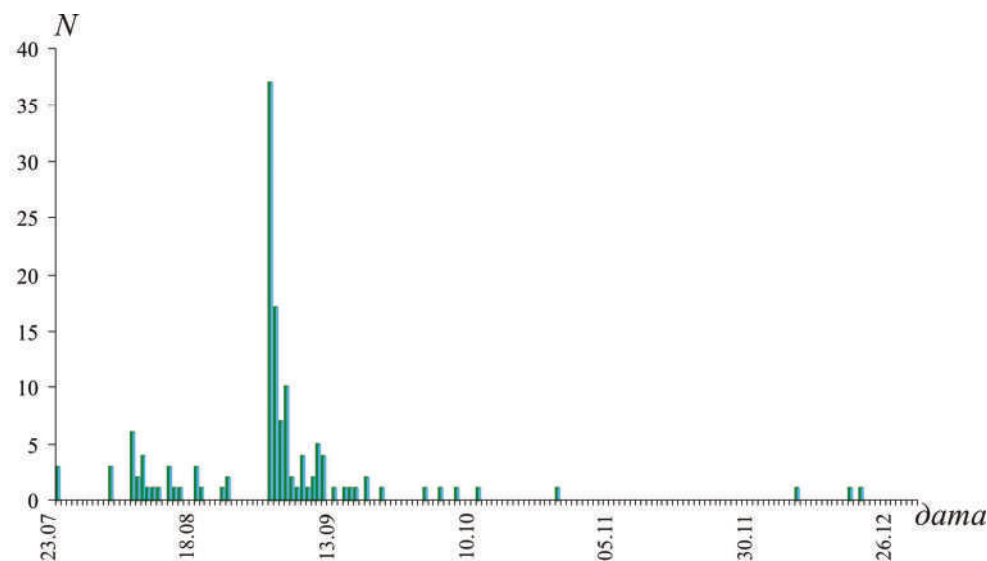


Рис. 2. Изменение во времени чисел землетрясений роя за каждые сутки в период с 23 июля по 31 декабря.

Карта эпицентров всех землетрясений роя (табл. 2) изображена на рис. 3, откуда видно, что все землетрясения роя расположены компактно на небольшой площади в пределах координат $\varphi=47.13\text{--}47.29^\circ N$, $\lambda=142.58\text{--}142.80^\circ E$. Максимальный толчок с координатами $\varphi=47.28^\circ N$ и $\lambda=142.63^\circ E$ локализован в северо-западной ее части.

Оценки магнитуды M в табл. 2, полученные по данным локальной сети цифровых станций, требуют контроля путем сопоставления их с магнитудами MLH в региональном каталоге [1] по данным аналоговой аппаратуры. В случае отсутствия определений MLH , оценки в табл. 2 контролировались по макросейсмическим данным с использованием методических приемов, изложенных в [8, 9]. Так, например, были получены оценки $M(I)$ для землетрясений 23 июля в 22^h27^m с ($M=M(I)=3.3$) и 2 августа в 13^h06^m с ($M=M(I)=3.8\pm 0.3$), что хорошо согласуется с оценками M по цифровым станциям и могут служить дополнением к магнитудным определениям в основном каталоге [1]. Хотя число землетрясений, для которых в табл. 2 имеются оба значения магнитуды (M и MLH) невелико ($N=13$ (рис. 4)), представляет интерес найти между ними хотя бы приближенную зависимость. Поиск уравнения связи выполнен *ред.* в виде:

$$y - \bar{y} = b(x - \bar{x})$$

методом ортогональной регрессии. В результате получено:

$$M = -0.8 + 1.17 MLH, \quad (1)$$

что конкретно дает, например, для $MLH=3.0, 4.0, 5.0$ следующие значения $M=2.7, 3.9$ и 5.1 соответственно.

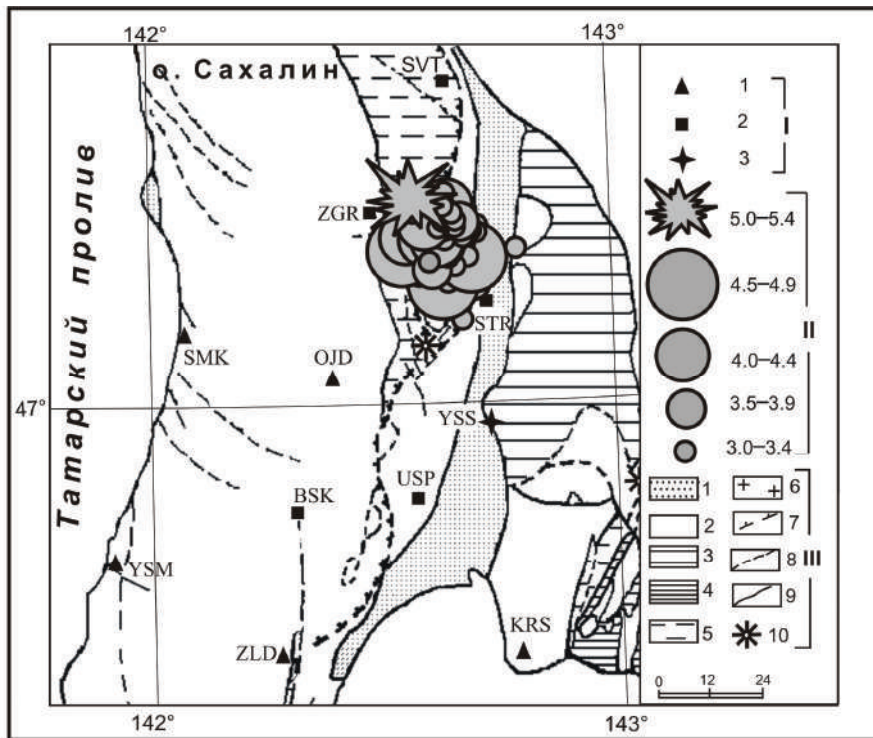


Рис. 3. Карта эпицентров роевых землетрясений с $M \geq 3.0$ за июль-сентябрь 2001 г. по данным сети цифровых станций

I – тип используемой аппаратуры: 1 – DAT, 2 – DM, 3 – IRIS; II – классификация по магнитуде; III – структурно-тектонический план: 1–7 – геологические формации: 1 – четвертичная Тымь-Поронайской депрессии; 2–7 – Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий: 2 – палеоген-неогеновая; 3 – метаморфитовая палеозой-мезозойская (сланцевая); 4 – металитовая (известняк-яшма-вулканит-глинисто-сланцевая) палеозой-мезозойская; 5 – метаобломочно-литолитовая меловая; 6 – гранитоидная; 7–8 – наиболее существенные дизъюнктивные дислокации (разрывы или разломы) разных модификаций: 7 – главный сместитель Тымь-Поронайского (Центрально-Сахалинского) взбросо-надвига; 8 – прочие, более мелкие разрывы; 9 – границы формаций; 10 – газоводогрязевые вулканы.

Список землетрясений роя целесообразно также использовать для поиска уравнения связи магнитуды M с энергетическим классом K_C , поскольку условия для этого оптимальные: все землетрясения возникли практически в одной очаговой зоне. Уравнение связи, рассчитанное по описанной выше схеме для 72 пар значений (K_C , M , рис. 4 б)), имеет вид:

$$M = 0.47 K_C - 0.2. \quad (2)$$

Данное уравнение было использовано *ред.* для расчета магнитуды M тех толчков, которые добавлены в табл. 2 из регионального каталога.

Рассмотрим более детально роевые землетрясения (рис. 5), зарегистрированные до главного толчка ($N=36$ (табл. 2)). Во времени их следует разбить на две группы. Первая группа включает 33 толчка, она реализовалась с 23 июля по 24 августа, после чего наступило затишье до 1 сентября (табл. 2, рис. 2). Эту группу толчков обозначила предваряющую активизацию процесса в очаговой зоне. Максимальное значение магнитуды в этой группе, равное $M=4.5$, имеют два толчка: 6 августа в 04^h53^m и 8 августа в 03^h15^m . Разница в магнитудном уровне с главным толчком составляет

$$\Delta M_{\Phi 1} = 5.2 - 4.5 = 0.7. \quad (3)$$

1 сентября, за час до главного землетрясения с $M=5.2$ и $t_0=13^h08^m$, отмечены сразу четыре толчка: в 12^h04^m с $M=4.2$, 12^h07^m с $M=3.4$, 12^h15^m с $M=4.8$ и 12^h36^m с $M=3.3$, которые можно интерпретировать, как «чистые» форшоки, обозначившие начало главного разрыва. Для них магнитудная ступень уменьшилась и равна

$$\Delta M_{\Phi 2} = 5.2 - 4.8 = 0.3. \quad (4)$$

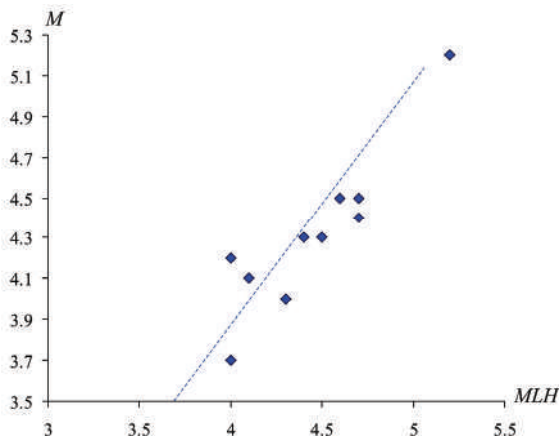


Рис. 4. Зависимость магнитуды M , определяемой по цифровым записям станций DAT и Datamark, от региональной магнитуды MLH

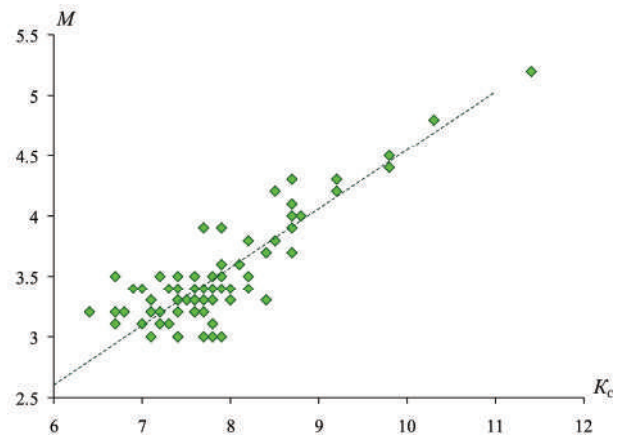


Рис. 5. Зависимость магнитуды M , определяемой по цифровым записям станций DAT и Datamark, от энергетического класса K_C

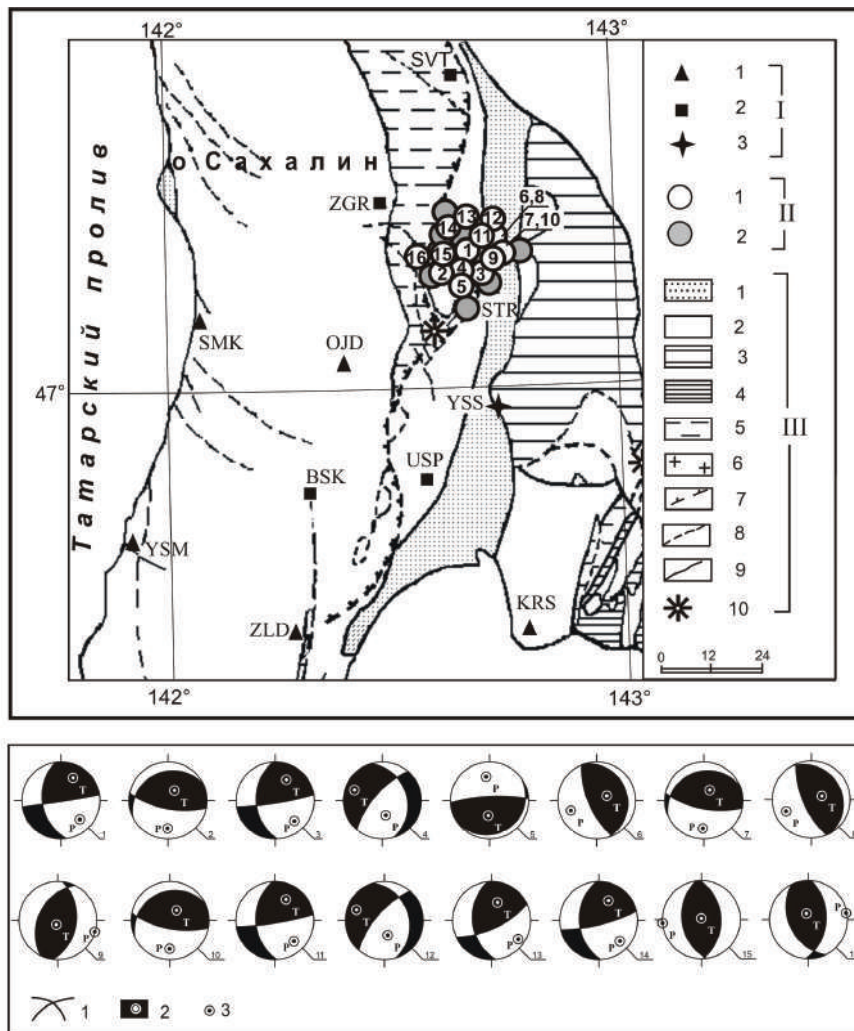


Рис. 6. Карта эпицентров роя землетрясений июля–августа 2001 г., предшествующих возникновению главного толчка 01.09.2001 г. с $M=5.2$, по данным сети цифровых станций и стереограммы механизмов очагов (для №№ 1–16 из табл. 2, 3) в проекции нижней полусферы

I, III – обозначения соответствуют рис. 2; II – эпицентры землетрясений: 1 – с известным механизмом очага; 2 – механизм не известен. На рис. стереограмм механизмов очагов землетрясений: 1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений: 2 – ось растяжения (T); 3 – ось сжатия (P); зачернена область прихода волн сжатия.

Процесс разрядки напряжений после основного события (рис. 7) типично «афтершоковый» – с интенсивным уменьшением числа толчков в первые 10 дней после главного толчка и отдельными афтершоками в дальнейшем. В эти периоды максимальными магнитудами характеризовались землетрясения 4 сентября в 08^h35^m с $M=4.4$ и 11 сентября в 08^h08^m с $M=3.7$ соответственно, и, следовательно, магнитудные ступени для этих интервалов составили

$$\Delta M_{a3} = 5.2 - 4.4 = 0.8, \quad (5)$$

$$\Delta M_{a4} = 5.2 - 3.7 = 1.5, \quad (6)$$

т.е. выше, чем для форшоков.

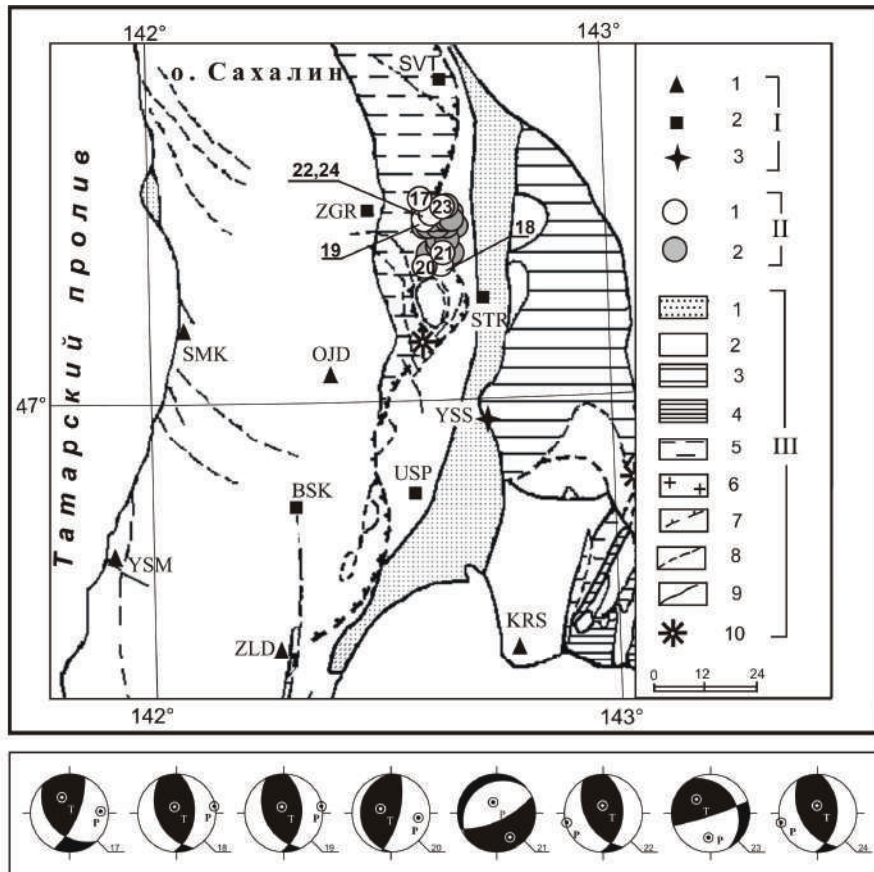


Рис. 7. Карта эпицентров афтершоков Такойского землетрясения 01.09.2001г. по данным сети цифровых станций и стереограммы механизмов очагов главного толчка (№ 17 в табл. 2, 3) и его афтершоков (№№ 18–24 в табл. 2, 3) в проекции нижней полусферы.

I – III – обозначения соответствуют рис. 6.

Механизм очагов определен для 24 землетрясений роя (табл. 3, рис. 6, 7). По данным о механизмах удалось восстановить характер напряженного состояния и соответствующие дислокации. Для определения механизмов использовались методы, изложенные в [10–13].

Таблица 3. Механизмы очагов землетрясений июля – сентября 2001 г. с $M \geq 3.0$ по данным наблюдений аппаратурой с цифровой регистрацией

№ в табл. 2	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Тип* подвижки
	T		N		P		NP1			NP2			
	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
1	30	28	47	259	28	135	81	88	137	172	47	02	сдвиг
2	62	32	13	277	25	181	101	71	104	245	23	56	взброс
3	35	28	45	255	25	137	81	84	135	177	46	08	сдвиг
4	21	291	26	32	55	167	221	71	-62	343	33	-143	сброс

№ в табл. 2	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Тип* подвижки
	T		N		P		NP1			NP2			
	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
5	55	185	06	86	34	352	267	80	96	55	12	58	пологий надвиг
6	64	64	2	158	26	249	343	19	96	157	71	88	пологий надвиг
7	62	29	11	278	25	182	101	71	102	249	22	60	взброс
8	64	71	02	336	26	245	330	19	83	157	71	92	пологий надвиг
9	80	201	10	16	01	107	206	45	104	7	47	77	взброс
10	62	32	13	277	25	181	101	71	104	245	23	56	взброс
11	35	28	45	255	25	137	81	84	135	177	46	08	сдвиг
12	21	291	26	32	55	167	221	71	-62	343	33	-143	сброс
13	46	18	40	228	15	125	65	71	133	174	46	27	взброс
14	39	26	44	246	22	134	76	80	135	177	45	15	сдвиг
15	87	356	3	175	0	265	358	45	94	172	45	86	взброс
16	75	341	15	170	02	80	4	49	110	154	45	68	взброс
17	50	334	34	189	18	87	23	71	127	137	41	30	взброс
18	75	341	15	170	02	80	4	49	110	154	45	68	взброс
19	75	341	15	170	02	80	4	49	110	154	45	68	взброс
20	64	292	5	192	26	100	14	71	95	179	20	76	пологий надвиг
21	26	151	5	243	64	342	65	71	-85	230	20	-104	поддвиг
22	72	355	18	165	03	256	4	45	115	150	50	67	взброс
23	44	315	27	75	34	185	332	28	168	72	85	63	взброс
24	72	355	18	165	3	256	4	45	115	150	50	67	взброс

* Классификация по типу подвижек осуществлялась по величине угла наклона PL к горизонту оси промежуточного напряжения (N) и нодальных плоскостей (DP1, DP2): сдвиги – $PLN \geq 45^\circ$; сбросы и взбросы – $PLN < 45^\circ$, $20 < DP1, DP2 < 70^\circ$; пологие надвиги и поддвиги – $PLN < 45^\circ, DP1 \geq 70^\circ, DP2 < 20^\circ$.

Таблица 3 (продолжение). Информация о достоверности решения задачи о механизме очага по данным наблюдений аппаратурой с цифровой регистрацией

№ в табл. 3	Число очагов в группе	Использованные знаки								Рассеяние			Число решений	
		Всего				Несогласованные				ЭВМ-решения, DLT°			LNL _{max}	Согласованных с SV, SH
		P		S		P		S		T	N	P		
+	-	SV	SH	+	-	SV	SH	T	N	P				
1	34	82	51	10	4	4	17	2	0	8	10	7	4	1
2	15	28	26	8	4	3	11	2	1	46	50	32	2	2
3	34	82	51	16	4	4	17	2	0	8	10	7	4	1
4	38	42	26	8	3	1	10	1	2	единственное				
5	15	10	12	9	5	1	1	0	1	5	6	5	38	2
6	14	38	17	7	4	0	0	3	1	1	1	1	1	1
7	15	28	26	8	4	3	11	1	1	46	50	32	2	2
8	14	38	17	7	4	0	0	1	2	1	1	1	1	1
9	14	8	10	9	7	3	0	0	0	21	27	29	53	1
10	15	28	26	8	4	3	11	2	1	46	50	32	2	2
11	34	82	51	10	5	4	17	2	1	8	10	7	4	1
12	21	42	26	8	4	1	10	0	0	единственное				
13	38	82	51	8	4	4	17	2	1	8	11	7	4	1
14	38	82	51	12	6	4	17	4	1	8	11	7	4	1
15	92	118	338			67	0			12	9	12		
16	16	16	55			6	0			16	16	16		
17	1	23	5	12	6	1	1	0	0	5	7	6	6	1
18	16	16	55			6	0			16	16	16		
19	16	16	55			6	0			16	16	16		
20	45	51	149			1	1			22	16	21		
21	8	19	26			1	1			19	21	13		
22	15	28	48			11	0			9	11	11		
23	11	23	43			9	3			19	57	58		
24	15	28	48			11	0			9	11	11		

Анализ механизмов очагов выполнен отдельно для форшоков (1–16 в табл. 2, 3 и на рис. 6), афтершоков главного толчка (18–24 в табл. 2, 3, рис. 7) и собственно главного толчка (17 из табл. 2, 3, рис. 8 а). Для удобства пользования построены стереограммы обобщенного поля напряжений отдельно для форшоков (рис. 8 б) и афтершоков (рис. 8 в).

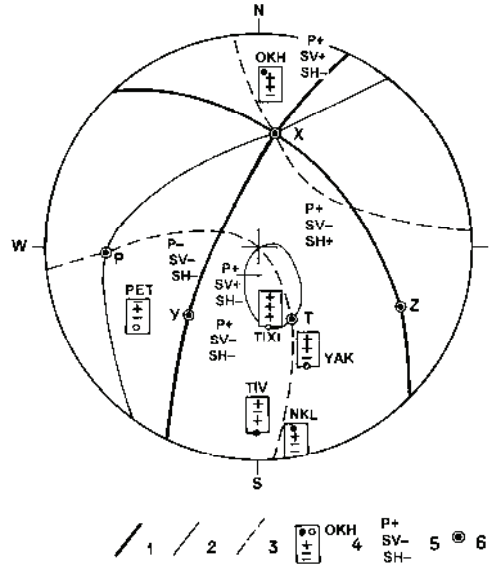


Рис. 8 а. Стереограмма механизма очага Такойдского землетрясения 1 сентября в 13^h08^m с $MLH=5.2$ (верхняя полусфера)

1–3 – нодальные линии $P=0$, $SV=0$, $SH=0$ соответственно; 4–5 – знаки первых смещений в волнах P , SV , SH : 4 – экспериментальные (пустой кружок соответствует волне, распространявшейся от очага вниз, зачерненный – волне, распространявшейся от очага вверх), 5 – теоретические; 6 – положение осей P , T , X , Y , Z решения механизма, согласованного со знаками в P -, Pg -, S - и Sg -волнах.

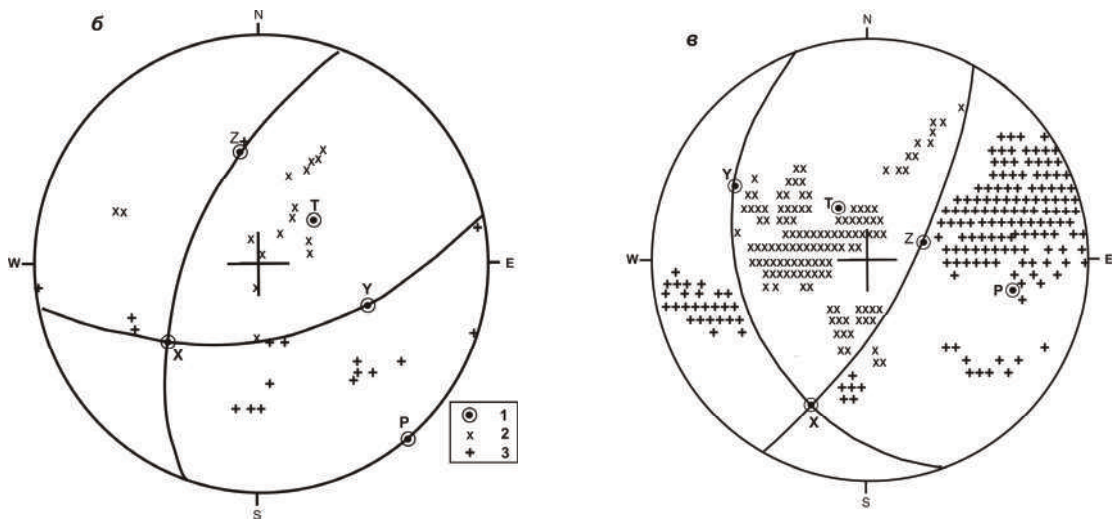


Рис. 8 б, в. Стереограммы механизмов очагов, обобщенных по всем очагам форшоков (б), афтершоков (в).

1 – среднее положение осей P , T , X , Y , Z ; 2, 3 – положение осей сжатия P и растяжения T в 85% достоверных областях группированных землетрясений.

Как видим (рис. 8 а, б, в, табл. 4), в очагах Такойдской серии Сахалинских землетрясений основными действующими были близгоризонтальные сжимающие напряжения. Характерная дислокация – взброс.

Очаг главного толчка находился под преимущественным воздействием близгоризонтальных сжимающих напряжений. При этом ось растягивающих напряжений была ориентирована диагонально. Дислокация в очаге – взброс. Движение висячих крыльев разрыва в очаге по субмеридиональной плоскости ($NP1$ в табл. 3) – на юг, по диагональной ($NP2$ в табл. 3) – восток–юго-восток.

Таблица 4. Характеристики обобщенного поля упругих напряжений в очаговой области Такойской серии ощутимых землетрясений 2001 г.

События	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Дислокация
	<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			
	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	
Главный толчок (рис. 6 а)	50	334	34	189	18	87	23	71	127	137	41	30	взброс
Форшоки (рис. 6 б)	55	50	34	231	00	140	200	54	47	79	54	133	взброс
Афтершоки (рис. 6 в)	58	329	18	203	23	102	28	70	110	162	28	46	взброс

Суммарная подвижка в очагах форшоков (рис. 8 б, табл. 4) по субмеридиональной плоскости (*NP1* в табл. 4) аналогична наблюдаемой в главном толчке (рис. 8 а, *NP1* в табл. 4). Однако направления подвижек – встречные. Аналогичная ситуация наблюдается и для альтернативных нодальных плоскостей.

В очагах афтершоков (рис. 8 в, табл. 4) суммарный механизм и направления подвижек по плоскостям аналогичны главному толчку.

Макросейсмические проявления. Землетрясение 1 сентября в 13^h08^m с $M=5.2$ произошло в густонаселенном районе на расстоянии 3–4 км от близлежащих поселков, где оно проявилось интенсивностью до 7 баллов. Детальное полевое обследование [3] обнаружило многочисленные свежесломанные деревья, свежие оползни и вывалы корней трещиноватых пород отмечены на обрывистых склонах русел рек. В качестве заметных сопутствующих явлений отмечаются изменения в характере грифонной деятельности Южно-Сахалинского (рис. 9, табл. 5) водогазоземного вулкана.

Стандартные сведения об ощутимости Такойского землетрясения в разных пунктах даны в табл. 5, а более подробные (как, например, число опросных листов в каждом пункте, отметки о наличии или отсутствии конкретных проявлений и др.) – приведены в разделе VIII (Дополнительные данные) наст. сб

Таблица 5. Макросейсмические данные о Такойском землетрясении 1 сентября в 13^h08^m с $M=5.2$

№	Пункт	Δ, км	№	Пункт	Δ, км
	<u>7 баллов</u>		18	пос. Ключи	22
1	пос. Углезаводск	3		<u>4 балла</u>	
2	пос. Сосновка	4	19	пос. Советское	23
	<u>6–7 баллов</u>		20	пос. Новоалександровск	26
3	Фермерский стан	4	21	пос. Фирсово	41
4	пос. Быков	6		<u>3–4 балла</u>	
5	пос. Покровка	6	22	г. Южно-Сахалинск	37
6	пос. Октябрьское	9	23	пос. Пятиречье	40
7	пос. Синегорск	15	24	пос. Яблочный	44
8	пос. Санаторный	19	25	пос. Костромское	45
	<u>6 баллов</u>		26	пос. Пионеры	46
9	пос. Ручьи	10	27	пос. Симаково	47
	<u>5–6 баллов</u>		28	пос. Чапланово	47
10	пос. Сокол	10	29	пос. Красноярское	50
11	пос. Такое	18	30	г. Чехов	53
	<u>5 баллов</u>		31	г. Анива	63
12	пос. Такое	8		<u>3 балла</u>	
13	г. Долинск	14	32	ст. Ожидаево	33
14	пос. Старорусское	15	33	пос. Троицкое	39
15	пос. Березняки	19	34	пос. Хомутово	44
16	пос. Стародубское	21	35	пос. Береговое	45
	<u>4–5 баллов</u>		36	пос. Бамбучки	46
17	пос. Загорское	11	37	пос. Успенское	48
			38	г. Холмск	52
			39	пос. Пожарское	52

№	Пункт	Δ, км	№	Пункт	Δ, км
40	пос. Огоньки	56	54	г. Томари	69
41	пос. Высокое	57	55	г. Корсаков	73
42	пос. Воскресенское	57	56	пос. Ясноморский	80
43	пос. Взморье	64	57	ст. Тихая	85
44	пос. Арсентьевка	70	58	г. Невельск	88
45	г. Горнозаводск	99	59	пос. Пугачево	102
	<u>2–3 балла</u>			<u>2 балла</u>	
46	пос. Христофоровка	46	60	пос. Восточка	50
47	пос. Мицулевка	53	61	пос. Чапаево	59
48	пос. Поляково	54	62	пос. Охотское	61
49	пос. Дачное	58	63	пос. Восточный	109
50	пос. Правда	61	64	пос. Шебунино	110
51	пос. Соловьевка	62		<u>Не ощущалось</u>	
52	пос. Рыбацкое	65		Лесное	57
53	пос. Калинино	68		Макаров	146

Карта всех обследованных пунктов с указанием балльности изображена на рис. 9 в целом и более детально – центральная зона на карте-врезке (рис. 9 а).

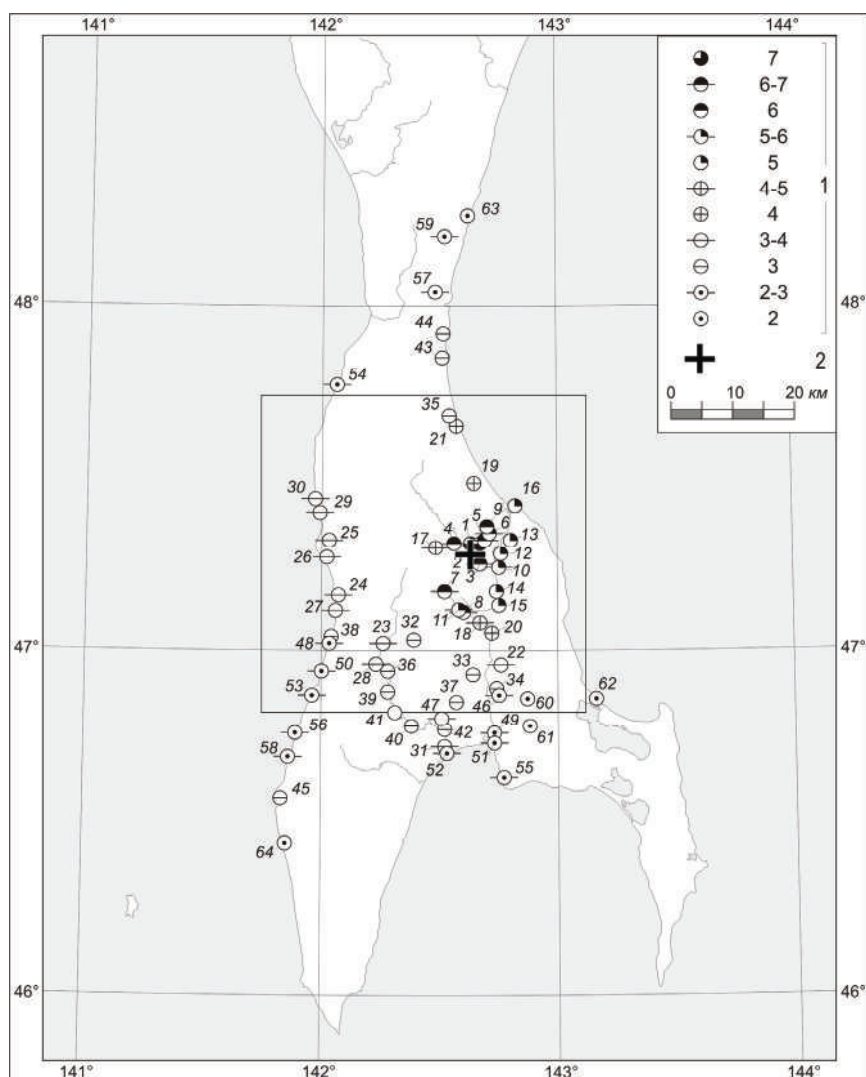


Рис. 9. Макросейсмический эффект Тахойского землетрясения 1 сентября в 13^h08^m с $M=5.2$

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64 [14]; 2 – инструментальный эпицентр.

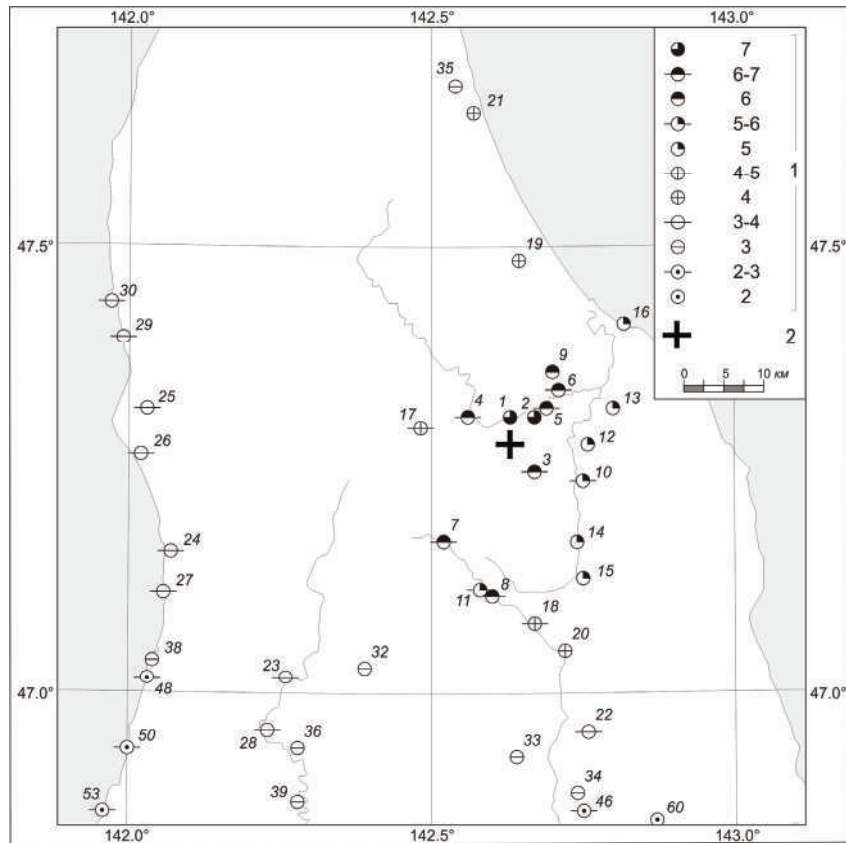


Рис. 9 а. Карта-врезка к рис. 9 для близэпицентральной области

Условные обозначения рис. 9.

Уравнение макросейсмического поля для главного толчка Такойской серии ощутимых землетрясений (рис. 10) получено по данным табл. 5.

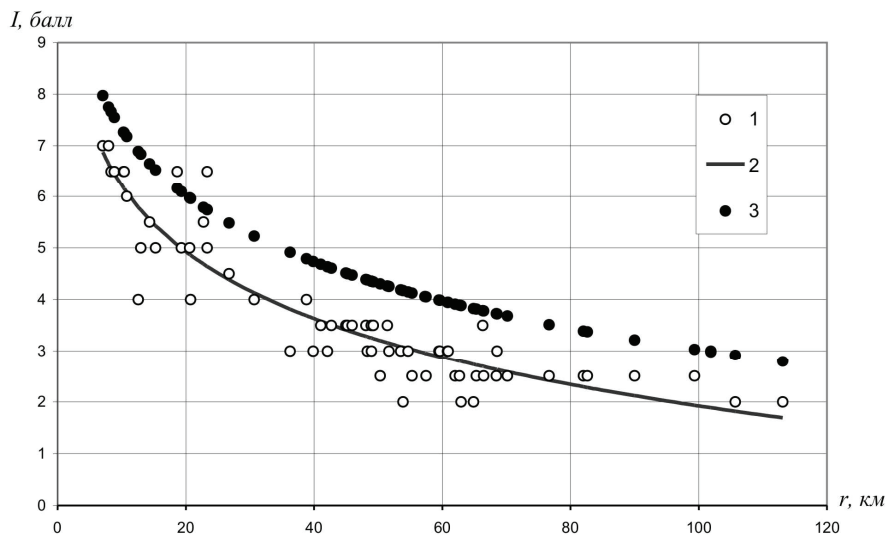


Рис. 10. Затухание интенсивности сотрясений I (балл) в функции гипоцентрального расстояния при Такойском землетрясении 1 сентября в $13^{\text{h}}08^{\text{m}}$ с $M=5.2$

1 – наблюдаемые данные; 2 – рассчитанная кривая, аппроксимирующая натурные наблюдения; 3 – данные, рассчитанные по уравнению Л.С. Оскорбина [15].

Математическая обработка экспериментальных наблюдений выполнена Д.А. Сафоновым. Искомое уравнение макросейсмического поля для Такойского землетрясения имеет вид:

$$I_i = 1.6 M - 4.3 \lg r_i + 2.2. \quad (7)$$

Значение свободного члена в этом уравнении меньше на 1.1, чем в уравнении из [15], полученном Л.С. Оскорбиным для Монеронского землетрясения.

Расхождения в значениях свободного члена отмечались и при сравнении уравнений из [15] и уравнении макросейсмического поля для Углегорско-Айнского землетрясения [16].

Отмеченные особенности в уравнениях макросейсмического поля носят, по-видимому, региональный характер и заслуживают более детального исследования на статистически значимом материале.

Л и т е р а т у р а

1. Паршина И.А., Фокина Т.А., Поплавская Л.Н. (отв. сост.), Мулякаева Н.К., Малашенко Ю.А., Сафонов Д.А., Юст А.А., Нагорных Т.В., Пермикин Ю.Ю., Поплавский А.А., Ким Чун Ун, Рудик М.И. Сахалин. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
2. *Bulletin of the International Seismological Centre for 2001.* – Berkshire: ISC, 2002–2003.
3. Иващенко А.И., Ким Чун Ун, Поплавская Л.Н., Фокина Т.А., Мельников О.А., Бобков А.О., Брагина Г.И., Дорошкевич Е.Н., Коваленко Н.С., Михайлов В.И., Мулякаева Н.К., Рудик М.И., Сен Рак Се, Спириин А.И., Сычаева Н.А. Эпицентральные наблюдения роя ощутимых землетрясений 2001 года на юге острова Сахалин инструментальные и макросейсмические данные // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений Северо-Запада Тихого океана. Т. II. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 161–193.
4. Бобков А.О., Мельников О.А., Поплавская Л.Н., Ким Чун Ун, Нагорных Т.В., Рудик М.И. Исследование современной сеймотектонической обстановки на юге о-ва Сахалин локальными сетями цифровых станций // Геодинамика, геология и нефтегазоносность осадочных бассейнов Дальнего Востока России. Т. I. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2004. – С. 176–197.
5. *Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2001 год* / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2001–2002.
6. Фокина Т.А., Паршина И.А., Рудик М.И., Сафонов Д.А. Сахалин. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
7. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока) // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР. (Методические работы ЕССН). – М.: Наука, 1989. – С. 32–52.
8. *Сейсмическое районирование территории СССР.* Методические основы и региональное описание карты 1978 г. – М.: Наука, 1980. – 308 с.
9. Оскорбин Л.С., Соловьёва О.Н., Соловьёв С.Л. VIII. Сахалин [1906–1974 гг.; $M \geq 4.5$; $I_0 \geq 5$] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. (Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин). – М.: Наука, 1977. – С. 358–373.
10. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Методика и первые результаты массовых определений механизмов очагов коровых землетрясений Дальнего Востока // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 95–99.
11. Мишарина Л.А. Напряжения в земной коре в рифтовых зонах. – М.: Наука, 1967. – 180 с.
12. Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. О напряжениях в очагах слабых землетрясений Прибайкалья // Физика Земли. – 1972. – № 4. – С. 24–36.
13. Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Балжинням И. Юго-западная граница Байкальской рифтовой зоны по данным о механизме очагов землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 2. – С. 74–83.
14. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
15. Оскорбин Л.С., Волкова Л.Ф. Параметры основного толчка и сейсмический режим афтершоков Монеронского землетрясения 5(6) сентября 1971 г. // Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке. – Владивосток: Наука (ДВО РАН), 1978. – С. 68–87.
16. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В., Фокина Т.А., Поплавский А.А., Пермикин Ю.Ю., Стрельцов М.И., Ким Чун Ун, Сафонов Д.А., Мельников О.А., Зудик М.И., Оскорбин Л.С. Углегорско-Айнское землетрясение 4 августа 2000 года, $MLH=7.0$, $I_0=8-9$ (Сахалин) // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 265–284.