

НЕВЕЛЬСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2 августа 2007 г. в 02^h37^m с $MLH=6.3$

и 05^h22^m с $MLH=6.0$, $I_0=8$ (о. Сахалин)

Д.А. Сафонов^{1,2}, Т.В. Назорных¹, Т.А. Фокина²

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, nagornyh@imgg.ru

² Сахалинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Геофизическая служба РАН, г. Южно-Сахалинск, fokina@seismo.sakhalin.ru

2 августа 2007 г. вблизи западного побережья южной части о. Сахалин произошла серия сильных землетрясений. Первое и самое сильное событие зарегистрировано в 02^h37^m с магнитудой $MLH=6.3$ [1, 2], $M_{wGCMT}=6.2$ [3]. Менее чем через три часа, в 05^h22^m, произошел еще один сильный толчок, сравнимый с первым по магнитуде – $MLH=6.0$, $M_{wGCMT}=6.0$. В 08^h06^m и в 10^h37^m зарегистрированы землетрясения с магнитудой $MLH=5.3$ и $MLH=5.6$ соответственно. Серия сильных землетрясений продолжилась и в последующие дни: наиболее сильное событие зарегистрировано 14 августа в 04^h13^m с магнитудой $MLH=5.7$ [1–3].

Интенсивность сотрясений, вызванных этими событиями, в г. Невельск составила 7–8 баллов для первого толчка, 6–7 баллов – для второго, 5–6 баллов для наиболее сильных последующих событий. Всего в этом районе 2 августа 2007 г. сейсмической сетью СФ ГС РАН было зарегистрировано 776 более слабых землетрясений [1], часть из них ощутимы. В этот день, по словам жителей г. Невельск и ближайших к нему поселков, трясло почти непрерывно, поэтому четко разделить макросейсмический эффект отдельных землетрясений, произошедших 2 августа, оказалось невозможно. Максимальный макросейсмический эффект, являющийся совокупным эффектом сильных землетрясений, произошедших на юге о. Сахалин 2 августа 2007 г., достигал 8 баллов в г. Невельск и пос. Селезнево и Лопатино Невельского района.

В г. Невельске отмечены многочисленные повреждения домов, разрушения в порту причала и сооружений, подъем брекватера на 1.5 м. Наблюдались трещины в асфальте шириной 2–4 см, приподнялось полотно моста. В домах разрушились печи, обвалилась штукатурка, провисли потолки. В отдельных домах упали лестничные пролеты с пятого по первый этажи. Наблюдались случаи обрушения балконов, образования сквозных трещин и провалов во внешних стенах (рис. 1). В результате обрушения элементов конструкций здания погиб один человек. Были признаны не пригодными к эксплуатации и подлежащими сносу 239 жилых домов, из 15 тысяч жителей около шести тысяч остались без крова. Материальный ущерб оценивается в 6 млрд. рублей [4].

В сборе и анализе инструментальных и макросейсмических сведений о землетрясениях участвовал коллектив ведущих специалистов ИМГиГ ДВО РАН и СФ ГС РАН.



а



б



Рис. 1. Примеры повреждений, вызванных Невельскими землетрясениями: сквозная трещина несущей стены шлакоблочного здания (а); обрушение лестничных пролетов 4-этажного здания (б); разрушение цеха сетеповиша (в); разрушения фасада здания общежития «Бригантина» (г); трещина дорожного полотна (д); разрушения дома культуры г. Невельска (е).
Авторы фотографий В.М. Кайстренко, Н.С. Коваленко

Эпицентры Невельских землетрясений определены авторами по совокупности наблюдений локальных [5], региональных [6] и глобальных [3, 7.] сетей сейсмических станций. В табл. 1 приведены параметры эпицентров двух наиболее сильных толчков, определенных по совокупным данным (SKHL), отдельно по данным локальной сети юга о. Сахалин SKHL (лок.), также приведен эпицентр, полученный по оперативным данным в течение суток после землетрясения SKHL (опер.). Ниже приведены определения параметров этих событий по данным некоторых сейсмологических агентств. Эпицентры землетрясений находились в Татарском проливе.

Таблица 1. Основные параметры Невельских землетрясений 2 августа 2007 г. с $MLH \geq 6.0$ по данным различных сейсмологических агентств

№	Агент-ство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Ис-точ-ник
				φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
2 августа 2007 г. $t_0=02^h37^m$											
1	SKHL	02 37 39.0	0.7	46.83	0.02	141.81	0.07	10		$MLH=6.3/5$, $K_C=11.7$	[2]
2	SKHL (лок.)	02 37 39.13	0.01	46.81	0.01	141.91	0.01	11.7	1.4	$MLH=6.3$	[1]
3	SKHL (опер.)	02 37 39.5	1.7	46.8	0.04	141.6	0.15	8		$MLH=6.1$	[4]
4	NEIC	02 37 42.38	0.17	47.12		141.80		5		$M_S=6./199$, $m_b=5.3/217$, $M_w=6.2$	[3]
5	GCMТ	02 37 42.40	0.10	46.84		141.82		12		$M_w=6.2/113$	[3]
6	MOS	02 37 40.7	1.12	46.91		141.73		9		$M_S=6.5/41$, $m_b=5.4/87$	[3]
7	JMA	02 37 33.6	0.4	47.22		141.72		0		$M_{JMA}=6.4$	[3]
8	ISC	02 37 44.6	0.09	46.95		141.79		21 21*	1.9*	$M_S=6.3/241$, $m_b=5.2/311$	[3]

№	Агент-ство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Ис-точник
				φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
2 августа 2007 г. $t_0=05^h22^m$											
1	SKHL	05 22 15.8	0.1	46.76	0.02	141.67	0.04	10		$MLH=6.0/7$, $K_C=12.0$	[2]
2	SKHL (лок.)	05 22 16.19	0.01	46.73	0.01	141.74	0.03	13.3	1.0	$MLH=6.0$	[1]
3	SKHL (опер.)	05 22 15.7	1.7	46.8	0.02	141.7	0.07	10		$MLH=6.0$	[4]
4	NEIC	05 22 17.69	0.1	46.71		141.72		10		$M_S=5.5/143$, $m_b=5.6/178$	[3]
5	GCMT	05 22 17.70	0.2	46.81		141.67		13	0.7	$M_W=5.8/97$	[3]
6	MOS	05 22 16.80	0.87	46.76		141.70		13		$M_S=5.6/66$, $m_b=5.8/124$	[3]
7	JMA	05 22 14.90	0.3	46.97		141.69		27		$M_{JMA}=5.9$	[3]
8	ISC	05 22 17.59	0.52	46.76	0.01	141.74	0.02	7.9	3.2	$M_S=5.6/196$, $m_b=5.5/307$	[3]
								18*	1.9*		

Примечание. Расшифровка кодов агентств дана в условных обозначениях к наст. сб.

Положения эпицентров Невельских землетрясений, определенные по данным различных агентств, показаны на рис. 2.

Для первого землетрясения ($t_0=02^h37^m$) наблюдается большой разброс в координатах эпицентра и отличие их от регионального решения. Сильнее всего – более 45 км к северу – смещен эпицентр агентства JMA, для агентства NEIC разница в положении эпицентра с региональным определением составляет 33 км, для MOS и ISC – несколько меньше; хорошее совпадение положения эпицентра отмечается только для агентства GCMT (рис. 2 а), однако в данном случае агентство публикует положение центра модельного центроида, использованного для определения тензора сейсмического момента события. Необходимо отметить значительный разброс в положении эпицентра, полученный в СФ ГС РАН при независимых определениях отдельно по оперативным, региональным и локальным данным. Вероятно, это стало следствием сложного характера записи первого толчка Невельской серии. На записях многих станций в широком азимуте от эпицентра выделяется относительно слабое первое вступление, которое плохо различается на удаленных или зашумленных станциях и может быть пропущено, следом же идет сильный импульс, который может быть принят за первое вступление (рис. 3 а). Такая же ситуация наблюдалась, например, при обработке Нефтегорского землетрясения 1995 г. [8].

Для второго эпицентра ($t_0=05^h22^m$) отмечается хорошее совпадение определений эпицентров для региональных и международных агентств, исключение составляет только агентство JMA (рис. 2 б), по данным которого эпицентр смещен на север на 24 км, что характерно для эпицентрии этого агентства, использующего в основном станции, расположенные значительно южнее о. Сахалин (ближайшие на о. Хоккайдо). Четкое импульсное первое вступление этого события определяется достаточно уверенно (рис. 3 б).

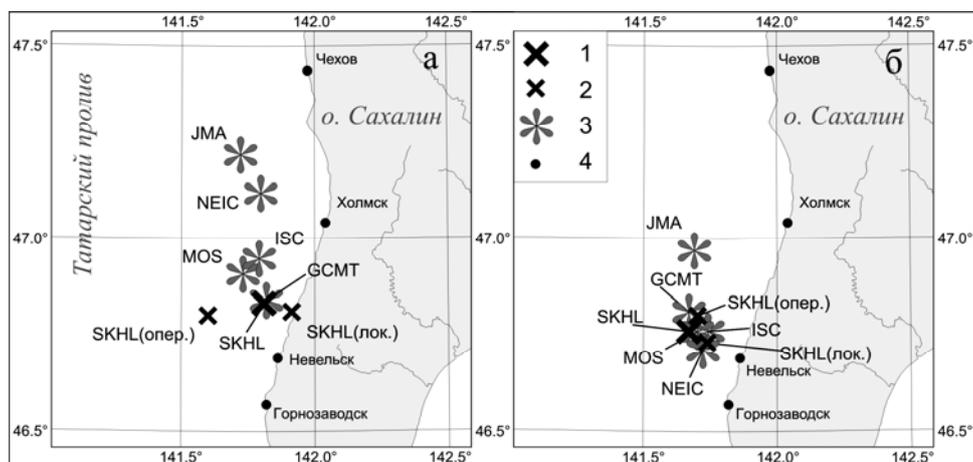


Рис. 2. Решения эпицентров двух наиболее сильных толчков ($t_0=02^h37^m$ (а) и $t_0=05^h22^m$ (б)) Невельской серии землетрясений 2007 г. по данным разных агентств

1 – эпицентр по данным регионального каталога [2]; 2 – эпицентр по данным локального каталога юга о. Сахалин [1] и данным оперативной обработки; 3 – эпицентр по данным других агентств; 4 – населенные пункты.

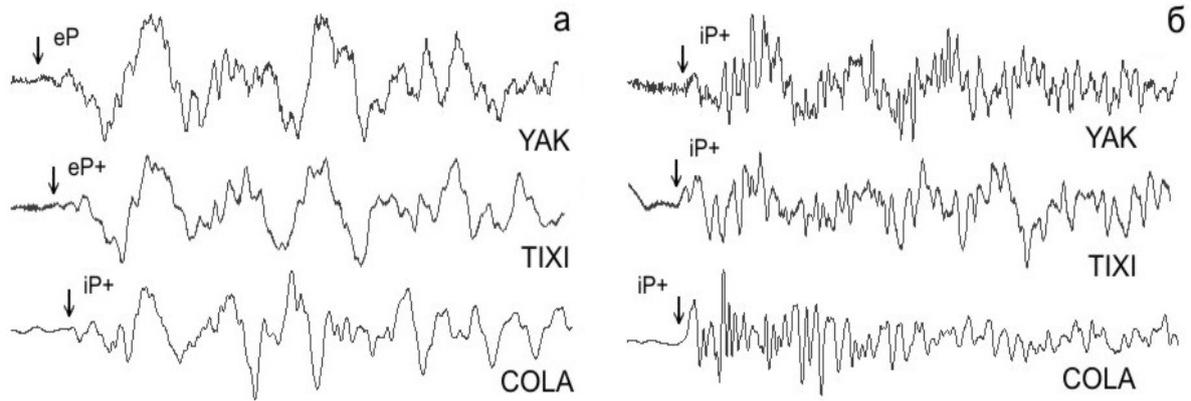


Рис. 3. Пример записи на вертикальной компоненте широкополосных сейсмических станций первого вступления землетрясений 2 августа 2007 г. в 02^h37^m (а) и 05^h22^m (б)

Определение механизмов очагов [9] осуществлялось по методике [10], разработанной группой авторов для малоинформативных систем сейсмологических наблюдений с использованием базовых алгоритмов программы «МЕХАНИЗМ» [11]. В качестве исходной информации использовались сведения о знаках первых смещений в волнах Pn , P^* , Pg , P , pP . Для уточнения полученного решения привлекались знаки первых движений в волнах S , Sn , S^* , Sg . По совокупности данных локальной, региональной и глобальной сетей удалось определить механизм очагов восьми землетрясений Невельской серии. На рис. 4 показаны стереограммы механизмов очагов двух наиболее сильных событий.

Механизм очага Невельских землетрясений с $MLH=6.3$ и $MLH=6.0$ определялся по данным о 52 и 47 знаках первых вступлений в волнах P , PG соответственно. Для уточнения решения, согласно [10], были привлечены данные о знаках SV , SH на ряде станций Дальнего Востока и сопредельных территорий.

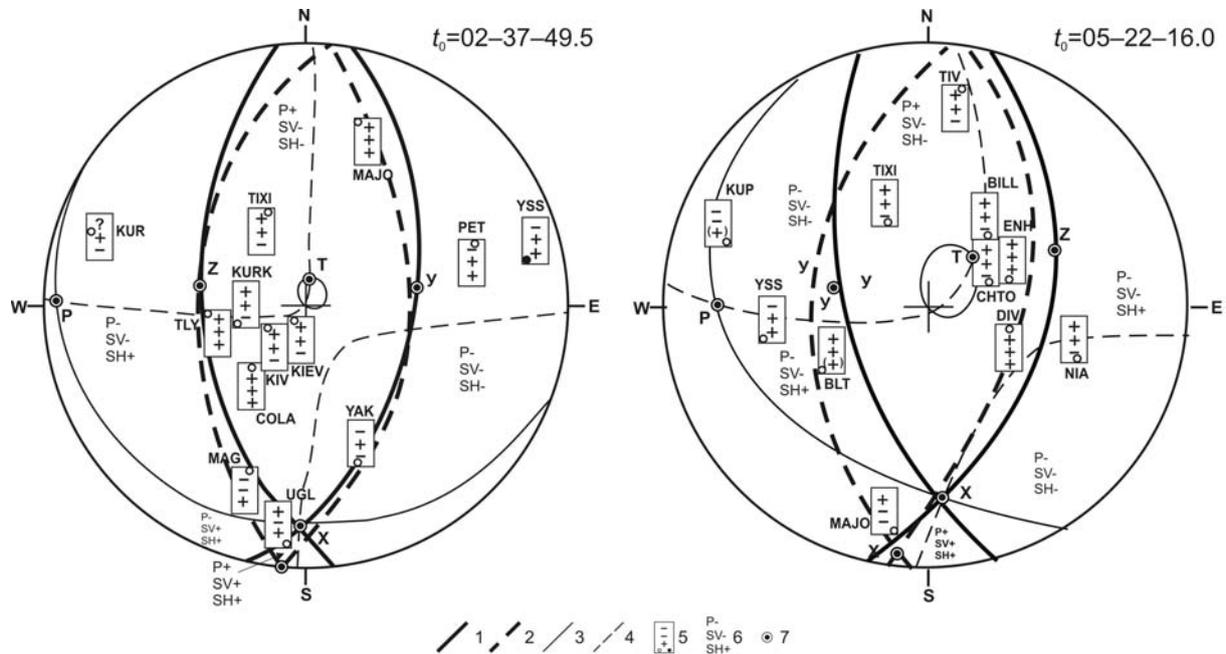


Рис. 4. Стереограммы механизмов очагов Невельских землетрясений 2 августа в 02^h37^m с $MLH=6.3$ и в 05^h22^m с $MLH=6.0$ (верхняя полусфера)

1, 2 – положение нодальных плоскостей решений агентств SKHL и GCMТ соответственно; 3, 4 – нодальные линии $SV=0$ и $SH=0$ соответственно; 5, 6 – экспериментальные (5) и теоретические (6) знаки первых смещений в волнах P , SV , SH (пустой кружок соответствует волне, распространявшейся от очага вниз, зачерненный – волне, распространявшейся от очага вверх); 7 – положение осей P , T , X , Y , Z для решений механизма, согласованных со знаками в P , PG , S , SG -волнах.

Таблица 2. Параметры механизма очагов восьми Невельских землетрясений в августе 2007 г. по региональным данным

Агентство	Дата, д м	t_0 , ч мин с	h_{pp} , км	Магнитуды			K_C	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис-точник
				M_W	M_S	M_s		T		N		P		$NP1$			$NP2$			
								PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
SKHL	02.08	02 37 39.1	21	6.2	6.5	6.3	11.7	79	188	11	3	1	93	194	45	105	353	47	75	[9]
–"–	02.08	05 01 45.9	46		4.8	4.9	10.6	63	64	25	222	9	316	205	59	60	73	42	129	–"–
–"–	02.08	05 22 16.2	18	5.8	5.6	5.6	12.0	67	216	18	355	14	90	203	35	123	344	62	69	–"–
–"–	02.08	06 04 41.3	19			4.6		68	64	20	218	9	311	204	57	66	63	40	122	–"–
–"–	02.08	08 06 27.6	13	5.2	4.8	4.8	11.1	86	56	0	146	4	236	146	49	90	326	41	90	–"–
–"–	02.08	10 37 29.6	11	5.4	5.2	5.2	10.6	69	151	21	339	3	248	318	46	60	177	51	117	–"–
–"–	04.08	22 21 52.3	11		4.1	4.3	10.6	54	163	36	338	2	69	310	57	46	191	53	137	–"–
–"–	14.08	04 13 34.2	10	5.4	5.2	5.1	11.1	60	221	30	41	0	311	14	52	51	247	52	129	–"–

Решения механизмов двух сильнейших землетрясений (табл. 2) хорошо согласуются между собой (рис. 4), отмечается незначительное увеличение сдвиговой компоненты во втором событии ($t_0=05^h22^m$). В соответствии с этими решениями, подвижка в очаге Невельских землетрясений произошла под действием близгоризонтальных ($PL=1^\circ$ и 14°) сжимающих напряжений, ориентированных широтно ($AZM=93^\circ$ и 90°). Оси промежуточных напряжений близгоризонтальны ($PL=11^\circ$ и 18°) и ориентированы почти меридианально ($AZM=3^\circ$ и 355°). Тип сейсмодислокации – взброс с небольшой сдвиговой компонентой. Одна из полученных нодальных плоскостей $NP1$ в обоих случаях имеет субмеридиональное ($STK=194^\circ$ и 203°) простираение и сравнительно полого ($DP=45^\circ$ и 35°) падает на запад–северо-запад, при этом западное крыло разрыва поднялось и немного сдвинулось на северо-восток (правосторонняя сдвиговая компонента). Другая возможная плоскость разрыва $NP2$ имеет север–северо-западное простираение ($STK=353^\circ$ и 344°) и падение на восток–северо-восток (левосторонняя сдвиговая компонента).

Положение облака афтершоков (рис. 5), глубина которых увеличивается в северо-западном направлении, позволяет предположить, что разрыв в очаге происходил вдоль первой плоскости $NP1$, имеющей падение на запад–северо-запад.

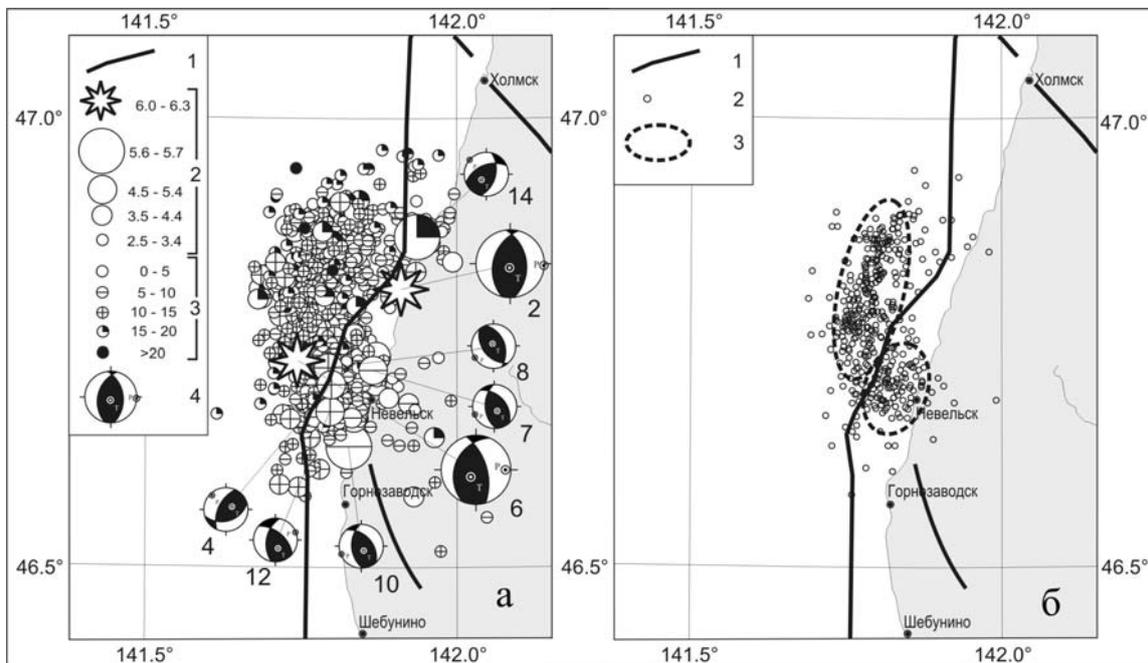


Рис. 5. Карта эпицентров Невельских землетрясений 2 августа 2007 г. и их афтершоков с $M \geq 2.5$ за весь период наблюдений (а) и за первые сутки после первого толчка в 02^h37^m (б) из [1]

1 – глубинный разлом по [12]; 2 – магнитуда M ; 3 – глубина гипоцентра h , км (а) и области сгущения афтершоков (б); 4 – стереограммы механизмов очагов землетрясений по региональным данным; числа возле них – номера сильных землетрясений в каталоге [2].

Параметры афтершоков Невельских землетрясений были определены по данным четырех региональных станций: «Южно-Сахалинск», «Тымовское», «Углегорск», «Оха» и девяти автономных цифровых сейсмических станций «ДАТ» локальной сети, которая работала в рассматриваемый период времени на юге острова и позволила регистрировать без пропусков землетрясения с магнитудой $M \geq 2.5$ в очаговой зоне. В течение восьми суток наиболее активного сейсмического процесса было зарегистрировано 1350 афтершоков, до конца 2007 г. – 1815 событий с $M=0.8-6.3$ [1].

В поле афтершоков первых суток на рис. 5 б можно выделить две зоны. Большая из них – размером $23 \times 10 \text{ км}^2$ – относится, вероятно, к очагу землетрясения в 02^h37^m, меньшая – размером $12 \times 8 \text{ км}^2$ – к событию с $t_0=05^h22^m$ и примыкает с нижнему краю большей зоны. Геометрия суммарного поля афтершоков повторяет излом Западно-Сахалинского разлома в этом районе.

Как было отмечено в монографии [4], согласно соотношению Уэллса и Коппершмита в [13], характеризующему зависимость величины магнитуды от размера очаговой зоны, магнитуда землетрясения, соответствующего размеру области афтершоков первых суток Невельской серии, должна быть не менее $M=6.6$, хотя размеры каждой из двух площадок согласуются хорошо с соответствующими магнитудами $M=6.3$ и $M=6.0$, что приводит к выводу о возникновении парных землетрясений. Их следует рассматривать в совокупности.

Для некоторых более слабых событий Невельской серии также удалось определить механизмы очагов землетрясений (табл. 2), диаграммы которых представлены на рис. 5. Все они унаследовали тип подвижки – взброс, поскольку произошли под действием близгоризонтальных сжимающих напряжений (PL от 0° до 9°). Однако направление осей сжатия изменяется весьма значительно. Простираение нодальной плоскости западного и северо-западного падения в очагах землетрясений №№ 4, 7, 8, 10, 12 совпадает с простираением изгибов Западно-Сахалинского разлома, хотя направление сдвиговой компоненты варьируется.

По результатам спутниковой радиоинтерферометрии [14] сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН выявлены косейсмические деформации земной поверхности прибрежной части о. Сахалин. Построены дислокационные модели сильнейших толчков. Моделирование показало, что вертикальные деформации земной коры наилучшим образом описываются двумя взбросами по двум сейморазрывам западного падения под углом $38-40^\circ$, хорошо согласующимися с решениями механизмов очагов парных Невельских событий, полученными сейсмологическими методами.

Макросейсмическое обследование территории Южного Сахалина было проведено силами двух коллективов – ИМГиГ ДВО РАН и СФ ГС РАН.

Максимальная интенсивность сотрясений достигала $I=8$ баллов в центральной и южной частях г. Невельска и в пос. Селезнево и Лопатино, а в северной части г. Невельска и в пос. Горнозаводск – $I=7$ баллов. Результаты детального макросейсмического обследования, представленные в [15, 16], для большей наглядности были сведены в табл. 2 и затем использованы при построении карты пунктов-баллов (рис. 7).

Необычным явлением для сравнительно несильного землетрясения оказалось цунами, которое местные жители наблюдали сразу после землетрясения. Его высота в пос. Ясноморский и Заветы Ильича составила не менее 2 м. Максимальный заплеск, по данным [16], достигал 3.2 м.

Другим интересным косейсмическим событием явилось вздымание прибрежного участка скального дна (бенча) в прибрежной зоне г. Невельска. Амплитуда поднятия узкой (до 250 м) полосы прибрежных алевролитов достигает в некоторых местах 1 м. Дно поднялось в зоне не менее 5.5 км длиной, захватив порт г. Невельска. Также во время землетрясения и непосредственно после него в устье р. Казачки зафиксированы интенсивные выходы метана [4].

Невельское землетрясение – сложное сейсмическое событие. В макросейсмической картине выделяется, по крайней мере, четыре сильных толчка 2 августа: в $t_0=02^h37^m$ ($MLH=6.3$), в $t_0=05^h22^m$ ($MLH=6.0$), в $t_0=08^h06^m$ ($MLH=5.3$) и в $t_0=10^h37^m$ ($MLH=5.6$), оказавшие отдельное независимое влияние и выделявшиеся наблюдателями как самые сильные. Причем в разных населенных пунктах наиболее сильным назывались разные землетрясения. Несмотря на то, что обследование началось на следующий день после землетрясений, крайне сложно оказалось выделить проявления отдельных толчков, поэтому приходится иметь дело с обобщенной макросейсмической картиной, явившейся результатом проявления всех сильных толчков первых суток Невельского сейсмического события.

Таблица 2. Суммарный макросейсмический эффект сильных землетрясений, зарегистрированных 2 августа 2007 г. в Сахалинской области

№	Населенный пункт	Эпицентральное расстояние сильнейших землетрясений 2 августа 2007 г., км				Расстояние до центра афтершоковой области
		$t_0=02^h37^m$ <i>MLH=6.3</i>	$t_0=05^h22^m$ <i>MLH=6.0</i>	$t_0=08^h06^m$ <i>MLH=5.3</i>	$t_0=10^h37^m$ <i>MLH=5.6</i>	
	<u>8 баллов</u>					
1	Невельск	16	16	16	7	11
2	Селезнево	25	21	19	5	19
3	Лопатино	26	20	18	4	20
	<u>7 баллов</u>					
4	Заречье	28	23	20	7	22
5	Горнозаводск	29	24	22	8	23
	<u>6–7 баллов</u>					
6	Ловецкая	14	17	18	11	10
7	Колхозное	21	22	21	8	16
	<u>6 баллов</u>					
8	Заветы Ильича	10	20	22	19	9
9	Ясноморский	10	17	19	15	6
10	Правда	19	32	36	37	23
11	Холмск	29	42	46	48	34
12	Ватутино	34	30	28	14	28
13	Шебунино	43	38	35	23	38
	<u>5 баллов</u>					
14	Калинино	12	25	29	28	15
15	Яблочное	41	54	58	61	46
16	Зеленодольск	43	50	51	40	41
17	Кириллово	57	60	59	45	53
18	Рыбацкий стан	55	60	60	47	52
	<u>4–5 баллов</u>					
19	Чапланово	35	48	51	48	38
20	Бамбучки	38	50	54	49	40
21	Пятиречье	40	53	57	55	43
22	Таранай	52	60	60	48	50
23	Золоторыбное	54	62	63	52	52
24	Анива	55	65	66	56	54
	<u>4 балла</u>					
25	Высокое	38	49	51	44	38
26	Огоньки	44	54	56	47	43
27	Ожидаево	49	62	66	62	52
28	Воскресенское	54	65	66	57	54
29	Костромское	57	68	73	77	62
30	Песчаное	59	69	70	59	58
31	Красноярское	65	75	80	86	70
32	Синегорск	66	79	83	80	69
33	Чехов	69	79	84	90	74
34	Новосибирское	73	83	88	94	79
	<u>3–4 балла</u>					
35	Пионеры	51	63	67	72	57
36	Мицулевка	53	64	66	57	53
37	Успенское	58	69	71	63	58
38	Троицкое	65	77	80	73	66
39	Тепловодское	66	80	83	79	69
40	Санаторный	67	80	84	80	70
41	Дачное	70	81	82	72	70

№	Населенный пункт	Эпицентральное расстояние сильнейших землетрясений 2 августа 2007 г., км				Расстояние до центра афтершоковой области
		$t_0=02^h37^m$ MLH=6.3	$t_0=05^h22^m$ MLH=6.0	$t_0=08^h06^m$ MLH=5.3	$t_0=10^h37^m$ MLH=5.6	
42	Хомутово	71	83	85	77	72
43	Соловьевка	71	81	82	72	70
44	Христофоровка	71	83	85	77	72
45	Южно-Сахалинск	73	85	88	81	75
46	Новоалександровск	73	86	89	83	75
47	Быков	78	91	95	94	82
48	Углезаводск	82	95	99	98	86
49	Покровка	86	99	103	101	90
50	Октябрьское	89	102	106	104	92
51	Ручьи	77	90	94	94	81
52	Новоселово	92	101	106	113	97
53	Пензенское	121	131	136	142	127
	<u>3 балла</u>					
54	Листвиничное	71	83	85	76	72
55	Первая Падь	73	82	84	72	72
56	Корсаков	76	85	86	74	75
57	Раздольное	79	88	89	77	78
58	Долинск	92	106	109	107	96
59	Советское	96	109	113	113	100
60	Стародубское	101	114	118	116	104
61	Озерский	103	112	113	101	102
62	Охотское	103	114	116	106	103
63	Томари	106	116	120	127	111
64	Крильон	107	103	99	87	102
65	Фирсово	108	120	124	126	112
66	Неводское	113	123	128	134	118
67	Береговое	119	128	129	117	118
68	Пихтовый	119	128	129	117	118
69	Взморье	124	136	141	144	129
70	Новиково	129	136	136	123	127
71	Ильинский	132	142	147	152	137
	<u>2–3 балла</u>					
72	Лесное	98	109	111	103	98
73	Мальково	117	128	130	119	117
74	Арсентьевка	132	144	148	152	137
	<u>2 балла</u>					
75	Березняки	79	92	95	90	81
76	Старорусское	80	93	97	92	83
77	Весточка	81	92	94	85	81
78	Чапаево	83	94	95	85	83
79	Сокол	84	98	101	98	88
80	Пригородное	86	95	96	84	85
81	Такое	87	101	104	102	91
82	Тихая	142	153	158	162	147

Для упрощения анализа макросейсмических проявлений Невельского землетрясения полученные результаты можно условно считать следствием одного сильного землетрясения. В этом случае за эпицентр этого «обобщенного» землетрясения принимается центр очаговой области, примерно соответствующий центру области афтершоков первых суток (рис. 5 б) с координатами $\varphi=46.78$, $\lambda=141.81$, а за глубину – наиболее характерная глубина этой совокупности землетрясений $h\approx 10$ км. Очаг Невельского события, соответствующий области эпицентров афтершоков первых суток, имеет размеры примерно 30×12 км и вытянут в субмеридианальном направлении вдоль побережья о. Сахалин (рис. 7).

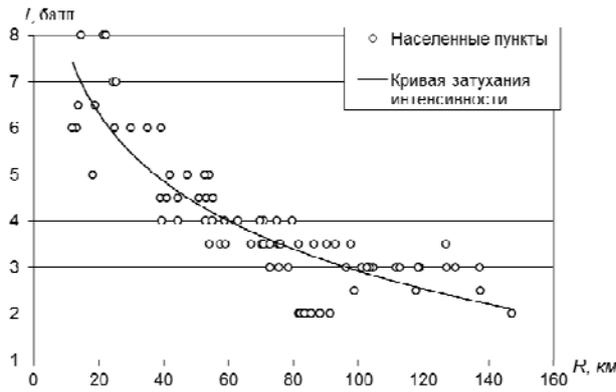


Рис. 6. График изменения интенсивности I сотрясений Невельских землетрясений августа 2007 г. от расстояния до центра области афтершоков первых суток

стояние ($R^2 = \Delta^2 + h^2$), M – магнитуа землетрясения, хотя в таком представлении ее значение не используется.

Соотношение (1) можно трактовать как осредненное уравнение макросейсмического поля данного землетрясения и использовать для построения круговых изосейст, радиус которых вычисляется следующим образом. Из уравнения среднего макросейсмического поля в [18] следует:

$$\bar{\Delta}_i = \sqrt{10^{\frac{2}{\nu}(bM+c-I_i)} - h^2}, \quad (3)$$

где $\bar{\Delta}_i$ – среднее эпицентральное расстояние до i -го балла, I_i – интенсивность расчетной изосейсты.

Однако радиус изосейсты и среднее расстояние до пункта с данной балльностью – понятия не тождественные, так как, по определению Н.В. Шебалина из [17]: «Ныне изосейстой принято называть внешний контур области уверенного определения данной макросейсмической интенсивности (балльности)». В процитированной работе предложена формула, связывающая радиус изосейсты со средним эпицентральным расстоянием:

$$\bar{\Delta}_i = r_i \cdot 10^{\frac{1}{2\nu}}. \quad (4)$$

Объединяя выражения (3) и (4), получаем формулу для вычисления радиуса круговых изосейст:

$$r_i = 10^{\frac{1}{2\nu}} \cdot \sqrt{10^{\frac{2}{\nu}(bM+c-I_i)} - h^2}. \quad (5)$$

Построенные по этой методике изосейсты нанесены на стандартную карту пункт-балл суммарного макросейсмического эффекта Невельской серии землетрясений 2 августа 2007 г. (рис. 7). При построении изосейст также учтена вытянутость очаговой области Невельских землетрясений. Этот эффект имеет значительное влияние на изосейсты больших баллов и сглаживается с расстоянием. Если принять примерную границу афтершоков первых суток размером 30×12 км за изосейсту максимального балла, то следующая за ней изосейста, повторяя очертания первой, должна быть вытянута в меридианальном направлении на величину $(30-12)/2=9$ км и на ту же величину меньше в широтном направлении. В соответствии с простираем нодальных плоскостей механизмов двух наиболее сильных толчков Невельской серии, полученные эллипсы изосейст повернуты по часовой стрелке на небольшой угол (10°).

Как видно из рис. 7, теоретические изосейсты довольно грубо отражают реально зарегистрированный макросейсмический эффект. Так, за пределы изосейсты $I=3$ балла вышло несколько населенных пунктов данной балльности. И наоборот, внутри изосейсты протянулся целый ряд пунктов с зарегистрированной интенсивностью на балл ниже расчетной, что может являться, например, следствием экранирующего влияния зоны проходящего западнее них Цен-

На основе данных об интенсивности сотрясений Невельского землетрясения в населенных пунктах южной части о. Сахалин были рассчитаны коэффициенты кривой затухания $I=f(R)$ на рис. 6 в виде:

$$I = 12.65 - 4.86 \lg R. \quad (1)$$

Сопоставим полученные параметры затухания с известным уравнением макросейсмического поля Н.В. Шебалина в [17]:

$$I = bM - \nu \lg r + c, \quad (2)$$

b , ν , c – параметры макросейсмического поля, средние значения которых равны:

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

Сравнивая (1) и (2), получаем: $b \cdot M + c = 12.65$; $\nu = 4.86$; R – гипоцентральное расстояние

трально-Сахалинского разлома или области относительно высоких скоростей сейсмических волн, связанных с Сусунайской депрессией, на границе которой эти поселки расположены. Влиянием именно этой локальной аномалии объясняется необычно высокий расчетный коэффициент затухания интенсивности $\nu=4.86$, в то время как региональный коэффициент затухания, согласно Л.Н. Оскорбину [19], составляет $\nu=4.3$, что в свою очередь значительно выше среднего значения $\nu=3.5$. Изосейста $I=5$ баллов также плохо отражает действительность, поскольку более половины пунктов данной балльности находятся за ее пределами. Вероятно, на этом расстоянии уже сказывается влияние сложного характера очага землетрясения. Так, максимальная интенсивность $I=8$ баллов зарегистрирована в порту г. Невельска, фактически оказавшемся в очаговой области землетрясения (судя по поднятиям дна акватории), и в двух поселках южнее города, однако в последних сильнее всего проявилось вечернее землетрясение в 10^h37^m ($MLH=5.6$), с эпицентром в южной части общей очаговой области (10 на рис. 5). По этой причине восстанавливать теоретические изосейсты более высоких баллов смысла не имеет. В целом макросейсмический эпицентр суммарного эффекта следует поместить на самый юг области афтершоков первых суток.

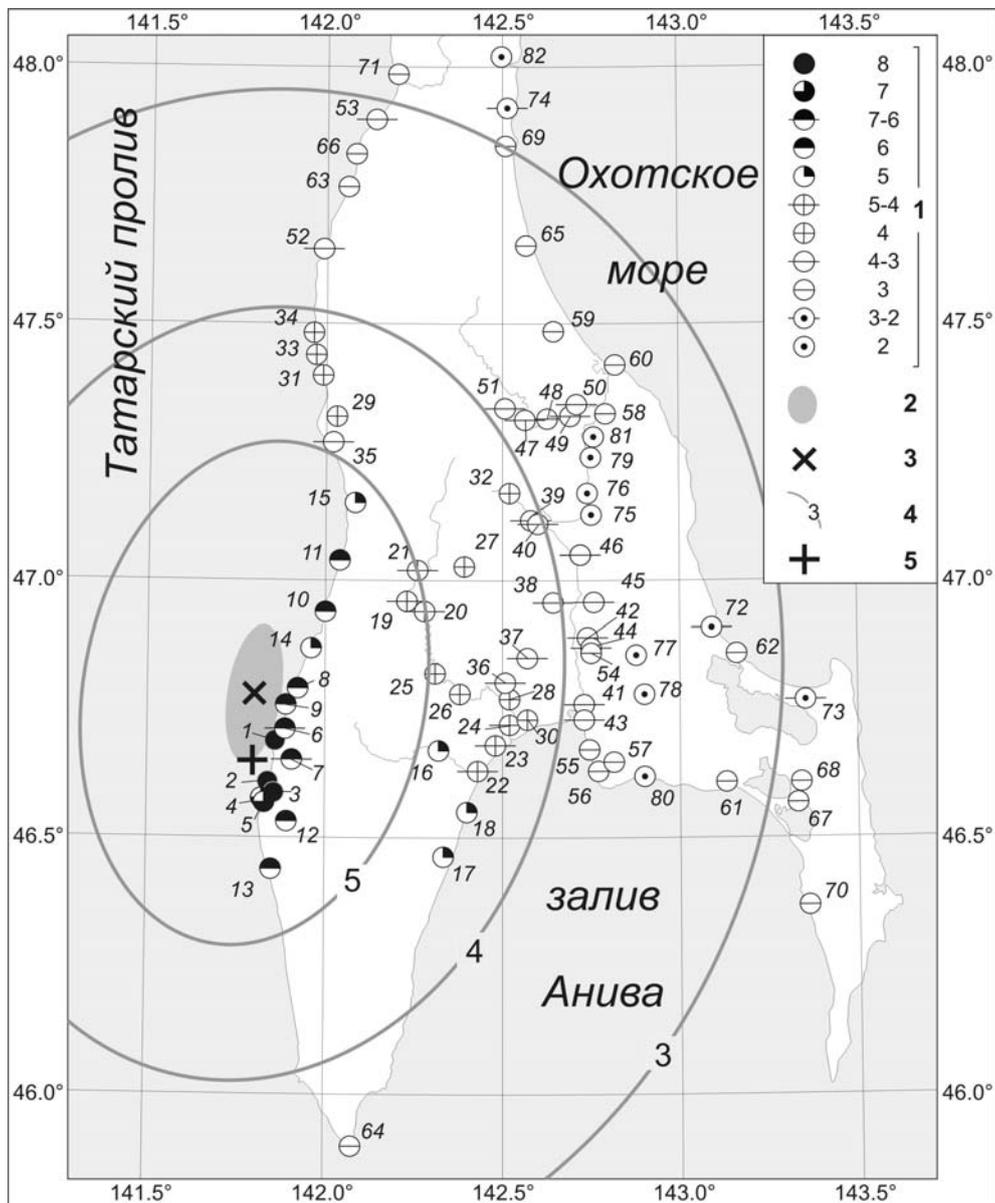


Рис. 7. Карта теоретических изосейст Невельских землетрясений 2 августа 2007 г.

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64; 2 – область афтершоков первых суток; 3 – центр области афтершоков первых суток; 4 – расчетная изосейста; 5 – макросейсмический эпицентр.

По историческим данным наиболее сильными сейсмическими событиями, произошедшими на юге о. Сахалин за 100 лет инструментальных наблюдений (до 2005 г.), являются Анивское землетрясение 1951 г. с $M=5.5$ [20], Монеронское землетрясение 1971 г. с $M=7.5$ [19] и Такоийский рой землетрясений 2001 г. с $M=5.6$ [21]. Многолетняя динамика сейсмического режима на юге о. Сахалин опубликована в статье И.Н. Тихонова [22]. В монографии [4] в главе 2 дается подробная характеристика сейсмичности юга о. Сахалин. Конкретно в рассматриваемом районе в течение ста лет в пределах Западно-Сахалинской системы глубинных разломов земной коры не зарегистрированы землетрясения с $M \geq 5$.

В рассматриваемой области И.Н. Тихоновым и Ч.У. Ким была выделена зона сейсмического затишья и объявлен прогноз [23, 24], который был рассмотрен и утвержден в августе 2006 г. Российским экспертным советом (РЭС) по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска. Сильное землетрясение с $M_w=5.6$, произошедшее 17(18) августа 2006 г. вблизи пос. Горнозаводск [25], показало, что процесс реализации долгосрочного прогноза перешел в активную фазу. Установив аномальность хода афтершокового процесса в течение первых шести суток и проанализировав ряд других геофизических данных, И.Н. Тихонов и Ч.У. Ким (ИМГиГ ДВО РАН) пришли к выводу, что Горнозаводское землетрясение является предвестником более сильного прогнозируемого события. Таким образом, 23 августа 2006 г. был принят краткосрочный прогноз сроком на 7.5 месяцев. Прогноз оправдался не полностью, так как разрушительное Невельское землетрясение с магнитудой $MLH=6.3$ произошло примерно на четыре месяца позже указанного в прогнозе срока. Авторами прогноза было отмечено, что Невельское землетрясение полностью укладывается в рамки долгосрочного (от 22 декабря 2005 года) прогноза сильного землетрясения на юго-западе о. Сахалин [24]. Оно произошло в южной части области сейсмической бреши второго рода [23] и оказалось приуроченным к Западно-Сахалинской системе глубинных разломов земной коры, протягивающейся вдоль западного побережья острова [4].

Л и т е р а т у р а

1. Сен Рак Се (отв. сост), Паршина И.А., Урбан Н.А. Каталог землетрясений юга Сахалина за 2007 г. ($N=2706$) и взрывов ($N=22$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
2. Кислицына И.П. (отв. сост.), Сохатюк А.С., Децик И.В. Каталог землетрясений ($N=628$) и взрывов ($N=22$) Сахалина за 2007 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
3. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2007.** – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2009. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/2007> xx
4. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Ред. Б.В. Левин, И.Н. Тихонов – М.: Янус-К, 2009. – 204 с.
5. Сен Рак Се. Юг о. Сахалин // Землетрясения России в 2007 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 72–75.
6. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Кислицына И.П., Михайлов В.И. Сахалин. (См. раздел (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
7. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2007 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2007–2008. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2007.
8. Оскорбин Л.С., Поплавский А.А., Стрельцов М.И., Шолохова А.А., Давыдова Н.А., Койкова Л.Ф., Садчикова А.А., Хритова Л.И. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года ($M_w=7.1$) // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 170–182.
9. Сафонов Д.А. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Сахалина за 2007 год ($N=8$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
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. Аптекман Ж.Я., Желанкина Т.С., Кейлис-Борок В.И., Писаренко В.Ф., Поплавская Л.Н., Рудик М.И., Соловьёв С.Л. Массовое определение механизмов очагов землетрясений на ЭВМ // Теория и анализ сейсмологических наблюдений (Вычислительная сейсмология; Вып. 12). – М.: Наука, 1979. – С. 45–58.

12. Стрельцов М.И., Рождественский В.С. Активные разломы Курило-Охотского региона, Сахалина, Приморья и Приамурья // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2–3. – М.: ОИФЗ РАН, 1995. – С. 387–407.
13. Wells D., Coppersmith K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // Bul. Seismol. Soc. Am. – 1994. – **84**. – N 4. – P. 974–1002.
14. Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Ким Ч.У., Такахаси Х. Косейсмические деформации земной поверхности на о. Сахалин в результате Невельского землетрясения 02.08.2007 г., $M_w=6.2$ // Тихоокеанская геология. – 2009. – 28. – № 5 – С. 16–21.
15. Урбан Н.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А., Кайстренко В.М., Семенова Е.П., Андреева М.Ю. Макросейсмические проявления Невельских землетрясений 2 августа 2007 года. – Препринт. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – 60 с.
16. Кофф Г.Л., Малаховский А.А., Ким Чун Ун. Роль характера застройки городов острова Сахалин в формировании сейсмического риска и анализ последствий Невельских землетрясения 18 августа 2006 г. и 2 августа 2007 г. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 59 с.
17. Шебалин Н.В. Проблемы макросеймики // Вычислительная сейсмология. Вып. 34. – М.: Геос, 2003. – 233 с.
18. Шебалин Н.В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. – М.: Наука, 1974. – 54 с.
19. Оскорбин Л.С., Волкова Л.Ф. Параметры основного толчка и сейсмический режим афтершоков Монеронского землетрясений 5(6) сентября 1971 г. // Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке. – Южно-Сахалинск, 1978. – С. 68–87.
20. Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. – М.: Наука, 1967. – 180 с.
21. Поплавская Л.Н., Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Ким Чун Ун. Такойское землетрясение 1 сентября 2001 г. $M=5.2$, $I_0=7$ (Сахалин) // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 331–344.
22. Тихонов И.Н. Динамика сейсмического режима юга Сахалина // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 5–20.
23. Тихонов И.Н. Сильные землетрясения в Сахалинской области: исследования и прогнозы // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 1. – С. 67–80.
24. Тихонов И.Н., Ким Ч.У. Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 года ($MLH=6.2$) на юге о-ва Сахалин // Доклады АН. – 2008. – **420** – № 4. – С. 532–536.
25. Фокина Т.А., Сафонов Д.А. Горнозаводское землетрясение 17 августа 2006 г. с $MLH=5.9$, $K_C=12.0$, $I_0=7$ (Сахалин) // Землетрясения Северной Евразии в 2006 году. – М.: ГС РАН, 2012. – С. 367–374.