

УДК 550.34

МЕТОДИКА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МАССОВЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ КОРОВЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Л. Н. Поплавская*, Т. В. Нагорных*, М. И. Рудик**

(*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ** Сахалинская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН)

Методика определений. Основным инструментом для массовых определений механизма очагов по-прежнему оставалась программа "МЕХАНИЗМ" [1], испытания базовых алгоритмов которой в Курило-Охотском регионе (наблюдения 1964-1994 гг.) показали [2] следующее:

1) точность получаемых решений заметно зависит от объема исходной информации: с его увеличением уменьшается размер 85% доверительной области и число возможных решений в этой области, для успешной работы алгоритма требуется не менее 40-50 знаков первых вступлений в Р-волне, равномерно распределенных по квадрантам.

2) в случае одностороннего расположения станций относительно очага землетрясения центр 85% доверительной области оказывается смещенным относительно решения с максимальным значением функции правдоподобия.

В регионах с преимущественно коровой активностью (Сахалин, Японское море, Приамурье и Приморье) для слабых землетрясений с $M \leq 4.5$ имелось, как правило, не более 20 знаков первых смещений в Р-волне, что явно недостаточно для получения устойчивого решения задачи о механизме их очагов.

С целью увеличения статистики знаков для коровых землетрясений были использованы знаки первых смещений в прямых волнах P_g . Кроме того, там, где это удавалось, использовались (по традиции [3]) знаки в волнах pP . Следует напомнить, что волны P_g и pP направлены от очага вверх и, следовательно, их использование улучшает не только *статистическую обеспеченность* решаемой задачи, но и *поквадрантное распределение* знаков, что особенно важно в условиях односторонне расположенной и разреженной сети сейсмических станций.

Для каждого из изученных сейсмических событий определение механизма очага выполнялось в два этапа.

На первом этапе решение задачи о механизме находилось с помощью ПЭВМ по знакам первых смещений в волнах P_n , P_g (или pP). Поскольку изучались, в основном, слабые землетрясения и, следовательно, число используемых знаков было невелико, 85%-ные доверительные области ЭВМ-решений, как правило, оказались очень большими. Статистический анализ доверительных оценок для ориентации осей напряжений сжатия Р, растяжения Т и промежуточного N показал, что ЭВМ-решения, найденные по знакам в Р и P_g -волнах, характеризуются следующими средними значениями рассеяния δ° положения осей: $\delta^\circ(T)=13^\circ \pm 9^\circ$, $\delta^\circ(P)=11^\circ \pm 7^\circ$, $\delta^\circ(N)=15^\circ \pm 11^\circ$ на Сахалине [4]; $\delta^\circ T=22^\circ \pm 13^\circ$, $\delta^\circ P=23^\circ \pm 14^\circ$, $\delta^\circ N=28^\circ \pm 16^\circ$ – для Приамурья и Приморья, $\delta^\circ T=17^\circ \pm 10^\circ$, $\delta^\circ P=14^\circ \pm 7^\circ$, $\delta^\circ N=18^\circ \pm 10^\circ$ – для северных участков Японского моря [5-8]. Поэтому, на втором этапе, ЭВМ-решения уточнялись вручную, с привлечением знаков SV, SH, SV_g , SH_g -волн и с использованием теоретических палеток нодальных линий для SV и SH-волн [3,9].

Привлечение данных о знаках SV и SH-волн позволяет существенно уменьшить (рис. 1,а,б) область возможных решений, а в целом ряде случаев приводит к единственному или небольшому набору близких решений (рис. 2,3,а-г). Это позволило уменьшить размеры доверительных областей таким образом, что, например, в регионе о. Сахалин по данным о механизмах более 130 очагов [4,9-12] $\delta^\circ(P)$ и $\delta^\circ(T)$ оказались близкими и составили $5^\circ \pm 2^\circ$, а для оси N – $7^\circ \pm 3^\circ$.

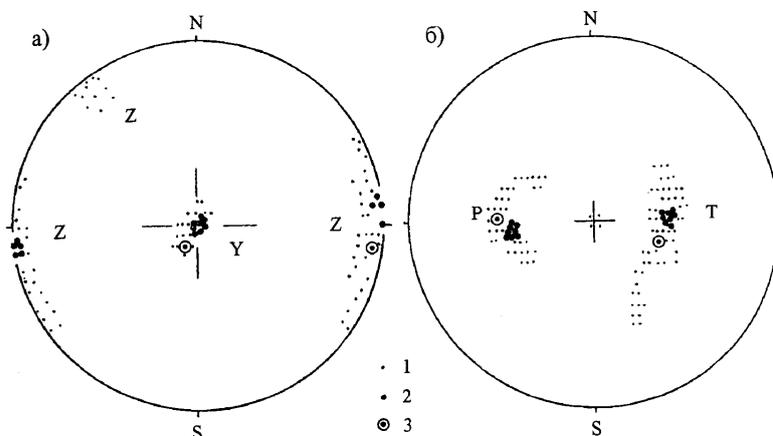


Рис. 1. Стереодиаграмма механизма очага землетрясения 05.04.1987 г. в $10^{\circ}57'$ (Сахалин) с $h=9$ км, $MLH=3.7$, $K_C=8.6$ [13] в проекции на верхнюю полусферу: а – выходы осей нодальных плоскостей Y,Z; б – выходы осей главных действующих напряжений P,T

1-3 – ЭВМ-решения: 1 – составившие 85% доверительную область; 2 – согласующиеся со знаками первых смещений в SV, SH, SV_g , SH_g -волнах; 3 – "среднее" (центр 85% доверительной области).

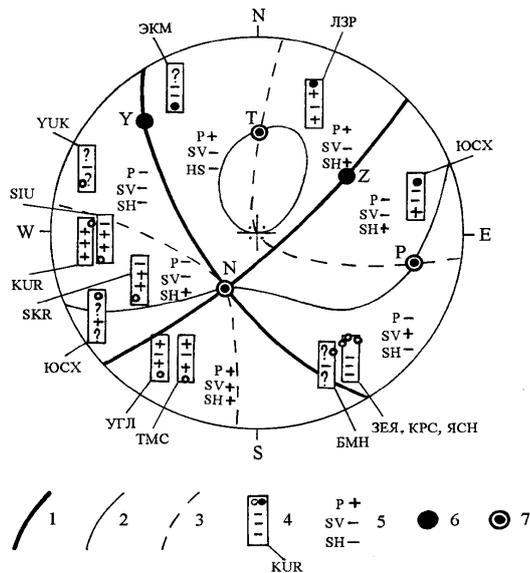


Рис. 2. Стереогрaмма механизма очага Приморского землетрясения 13.11.1990 г. в 02^h35^m с $h=16$ км, $MLH=6.2$, $MPV=6.2$, $MPH=6.2$, $MSH=6.4$ [14] в проекции на верхнюю полусферу

1-3 – нодальные линии P, SV, SH-волн, соответственно; 4 – экспериментальные знаки первых смещений в P, SV, SH-волнах (пустой кружок соответствует волне, распространяющейся от очага вниз, зачерненный – волне, распространяющейся от очага вверх); 5 – теоретические знаки первых смещений в P, SV, SH-волнах; 6 – оси Y,Z; 7 – оси P,T,N.

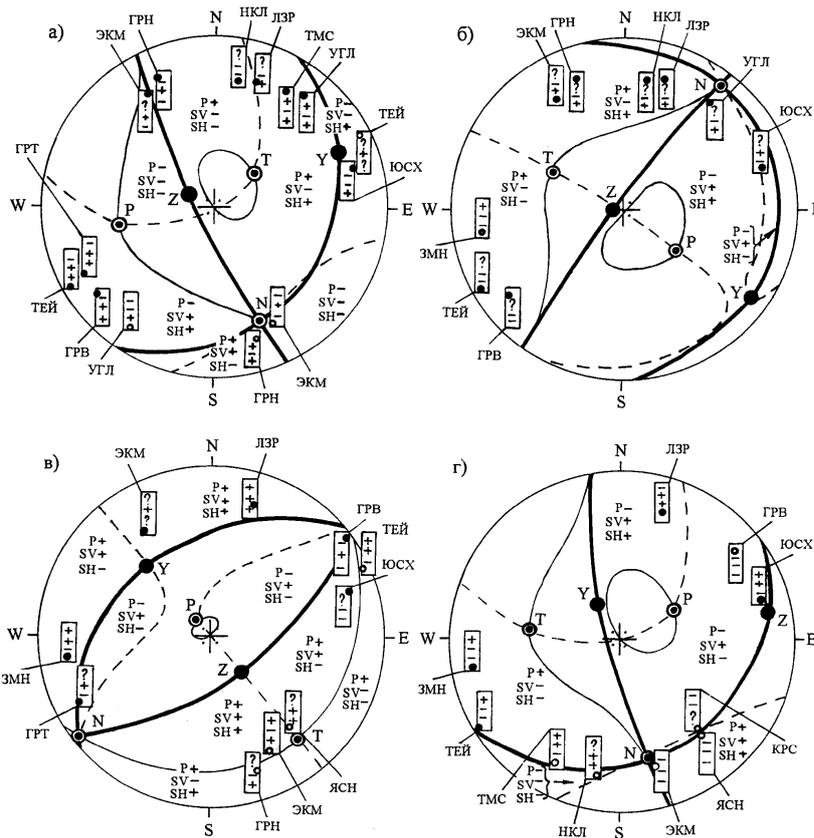


Рис. 3. Стереогрaммы механизмов очагов четырех афтершоков Приморского землетрясения [14] в проекции на верхнюю полусферу: а – 14.11.1990 г. в 14^h43^m; б – 14.11.1990 г. в 15^h37^m; в – 25.12.1990 г. в 10^h27^m; г – 09.08.1991 г. в 04^h53^m (табл. 1)

Условные обозначения см. на рис. 2.

Результатом использования вышеописанной методики явились:

1. Представительный каталог механизмов очагов коровых землетрясений с $K_C \geq 9$ на о. Сахалин за 1962-1998 гг., а также механизмы афтершоков Монеронского и Нефтегорского землетрясений [4,9,11,12]; каталоги механизмов землетрясений северной части Японского моря [5-7]; каталог механизмов коровых землетрясений Приморья и Приамурья (табл. 1-3; рис. 4; [8,15]).

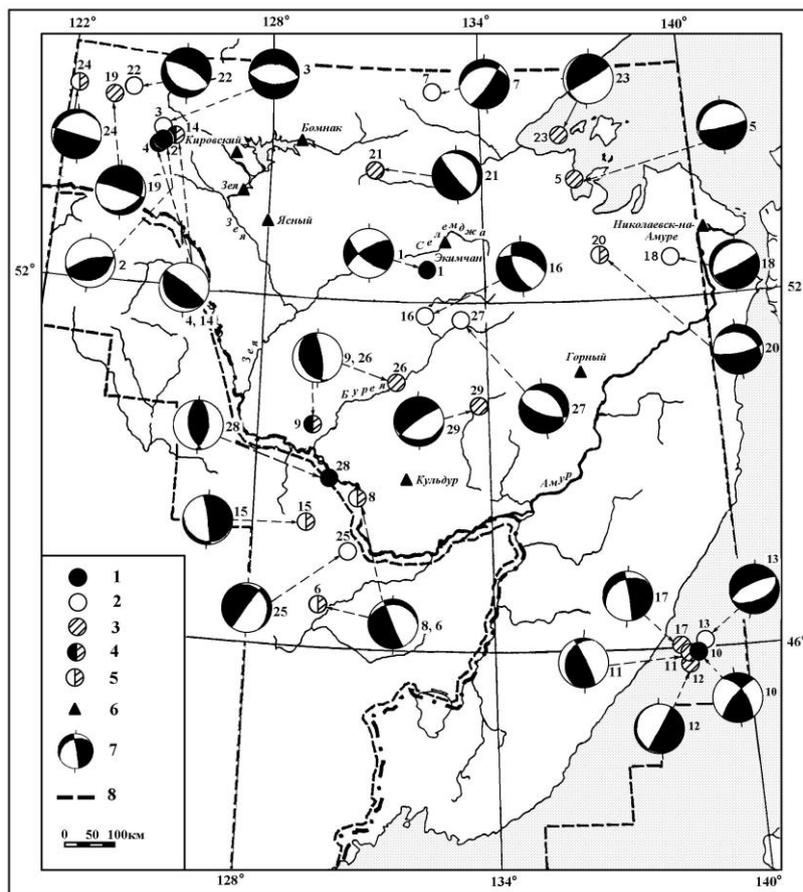


Рис. 4. Механизм очагов коровых землетрясений Приамурья и Приморья за 1987-1994 гг.

1-5 – типы напряженного состояния в очаге землетрясения (1-2 – преобладает близгоризонтальное сжатие и растяжение, соответственно; 3 – оси Р и Т наклонены к горизонту под равными углами, в пределах точности решения; 4-5 – близгоризонтальное сжатие и растяжение, соответственно, установленные неуверенно); 6 – сейсмическая станция; 7 – стереограмма механизма очага в проекции на нижнюю полусферу; 8 – граница региона. Номера землетрясений соответствуют таковым в графе 1 табл. 1-3.

Решению задачи о механизме очагов коровых землетрясений (табл. 1) предшествовало *уточнение глубин залегания гипоцентров*, оценки которых в опубликованных ранее каталогах, как правило, отсутствовали. Получение устойчивых оценок h , δh для дальневосточных землетрясений с гипоцентрами в земной коре также является немаловажным для практики сейсмологических обобщений результатом.

Наконец, картирование результатов определения механизмов (рис. 4) позволяет получить представление о пространственном распределении основных сейсмодислокаций, вариациях поля упругих напряжений и их связи с тектоникой изучаемого региона.

Описанная методика была *передана в эксплуатацию* в отряд сводной обработки СОМСП ГС РАН и осваивалась в процессе определения механизмов очагов за 1996 г. Механизмы очагов коровых землетрясений за 1995 г. (Нефтегорская серия афтершоков и другие сейсмические события на Сахалине) определены совместно лаб. сейсмологии ИМГиГ ДВО РАН и ОСО СОМСП ГС РАН.

Таблица 1. Основные параметры коровых землетрясений Приамурья и Приморья с известным механизмом очага за 1987-1994 гг.

№	Дата, д мес год	t_0 , ч мин с			Эпицентр		h^* , км	δh , км	MLH	K_p
					φ° , N	λ° , E				
1	2	3			4	5	6	7	8	9
1	05.03.87	20	39	22.2	52.51	132.53	16	4	5.2	14.0
2	23.07.89	12	01	30.1	54.52	124.89	13	3	5.3	13.5
3	23.07.89	14	32	59.9	54.56	124.89	10	2		10.3
4	24.07.89	01	35	23.5	54.52	124.92	10	2		10.0
5	03.08.89	21	46	20	54.08	136.76	13	2		10.9
6	05.05.90	13	10	28.4	46.77	129.78	10	2		11.8
7	02.06.90	17	11	21.7	55.60	130.65	12	3		11.8
8	17.07.90	03	37	25.9	48.68	131.97	12	2	4.6	
9	16.10.90	12	04	26.7	49.83	129.53	12	4		11.5
10	13.11.90	02	35	03.6	45.90	138.92	16	3	6.2	
11	14.11.90	14	43	34.4	46.01	138.85	16	2	4.9	
12	14.11.90	15	37	45.7	45.95	138.82	16	3	4.2	
13	25.12.90	10	27	36.8	45.99	138.89	16	3		10.3
14	19.05.91	16	17	47.5	54.58	125.27	10	3		11.7
15	09.06.91	19	23	29.7	48.10	129.45	10	3		12.0
16	28.06.91	11	20	44.8	51.77	132.46	12	4		11.2
17	09.08.91	04	53	31.6	46.00	138.65	11	3		11.2

№	Дата, д мес год	t ₀ , ч мин с			Эпицентр		h*, км	δh, км	MLH	K _p
					φ°, N	λ°, E				
1	2	3			4	5	6	7	8	9
18	28.12.91	00	14	45.1	52.70	139.17	11	4		11.1
19	09.07.92	21	52	51.1	55.18	123.33	7	2		11.2
20	16.07.92	05	03	42.6	52.82	137.26	7	2		11.0
21	21.07.92	16	33	26.5	54.13	131.03	8	2		11.5
22	25.02.93	07	40	19.6	55.34	123.84	5	2		10.8
23	12.06.93	16	04	07.6	54.86	136.47	12	3	4.0	11.6
24	20.06.93	17	46	19.6	55.23	122.20	5	3	3.9	10.7
25	01.10.93	22	40	06.2	47.68	130.46	12	2	5.0	12.9
26	26.01.94	12	14	03.3	50.57	131.53	7	2		11.4
27	05.05.94	03	36	37.1	51.59	133.45	7	2	4.7	12.7
28	04.06.94	19	36	10.4	48.92	129.92	10	2	4.6	12.1
29	24.08.94	22	21	07.9	50.17	133.90	7	3	4.4	11.5

Примечание. В графе 6 дана глубина гипоцентра h*, определенная по фазам sP, pP, отраженным вблизи эпицентра.

Таблица 2. Механизмы очагов коровых землетрясений Приамурья и Приморья за 1987-1998 гг.

№	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Сейсмо- дислокация *
	T		N		P		NP1			NP2			
	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	44	94	46	267	03	00	127	58	148	235	64	36	сдвиг
2	68	162	04	63	22	331	245	67	94	54	24	81	взброс
3	00	02	01	272	89	92	92	45	-89	271	45	-91	сброс
4	60	217	01	124	30	33	305	75	92	119	15	84	пологий надвиг
5	35	174	02	265	55	358	85	80	-88	255	10	-100	пологий надвиг
6	38	251	09	349	50	90	170	84	-81	292	11	-148	пологий надвиг
7	30	139	13	41	57	291	263	19	-47	38	76	-103	пологий надвиг
8	38	238	09	335	50	77	156	84	-81	278	11	-148	пологий надвиг
9	64	269	05	169	26	77	351	71	95	156	20	76	пологий надвиг
10	40	183	48	24	12	282	226	71	142	330	54	24	сдвиг
11	54	228	15	339	32	79	210	19	142	336	78	75	пологий надвиг
12	43	121	01	212	47	303	32	88	-89	176	02	-126	пологий надвиг
13	13	319	03	50	77	152	232	58	-87	46	32	-95	сброс
14	51	214	01	123	39	32	303	84	91	117	06	84	пологий надвиг
15	38	69	09	166	50	268	347	84	-80	109	11	-148	пологий надвиг
16	04	227	25	319	65	129	159	54	-59	293	47	-125	сброс
17	35	94	17	352	50	240	236	19	-24	349	82	-107	пологий надвиг
18	35	152	01	243	55	334	63	80	-89	237	10	-96	пологий надвиг
19	38	11	09	109	50	210	290	84	-81	52	11	-148	пологий надвиг
20	24	190	11	95	63	342	303	23	-60	91	70	-102	сброс
21	30	224	01	134	60	43	134	75	-91	317	15	-87	пологий надвиг
22	18	29	04	298	72	194	126	28	-81	295	63	-95	сброс
23	51	334	05	238	39	144	59	84	95	198	08	50	пологий надвиг
24	39	188	06	282	51	20	103	84	-84	238	08	-135	пологий надвиг
25	38	291	09	29	50	130	210	84	-81	332	11	-148	пологий надвиг
26	59	244	05	146	30	54	328	75	95	129	15	72	пологий надвиг
27	18	215	06	123	71	15	314	28	-77	120	63	-97	сброс
28	87	356	03	175	00	265	358	45	94	172	45	86	взброс
29	39	348	01	257	51	166	83	06	-84	257	84	-91	пологий надвиг

Примечание. Номера землетрясений в графе 1 соответствуют таковым в табл. 1. Классификация по типу сейсмодислокаций в графе 14 осуществлена по величине угла наклона PL к горизонту оси промежуточного напряжения N [15] и нодальных плоскостей (DP1, DP2): сдвиги - PLN ≥ 45°; сбросы и взбросы - PLN < 45°, 20° < DP1, DP2 < 70°; пологие надвиги - PLN < 45°, DP1 ≥ 70°, DP2 ≤ 20°.

Таблица 3. Информация о достоверности решения задачи о механизме очагов

№	Использованы знаки								Рассеяние ЭВМ-решения, δ°			Число решений согласованных с LN, L Max		с SV, SH	
	Всего				Не согласованы										
	P		S		P		S		T	N	P	13	14		
	+	-	SV	SH	+	-	SV	SH	10	11	12	13	14		
1	32	23	10	10	6	4	0	0	4	4	4	1	1		
2	11	17	8	8	1	1	0	0	11	33	33	1	3		
3	7	5	6	6	2	1	0	0	36	42	39	30	1		
4	5	7	7	6	1	0	0	1	20	16	23	1	3		
5	11	5	12	7	0	0	2	1	18	37	33	4	1		
6	11	7	13	13	2	2	2	2	17	16	21	3	1		
7	7	8	8	7	0	4	0	1	13	19	20	14	1		
8	9	9	10	12	0	3	2	0	53	56	32	2	1		
9	9	12	17	17	1	3	0	0	28	51	42	12	1		
10	76	57	17	11	25	8	0	0	4	4	2	1	1		
11	8	10	14	14	3	2	0	0	26	26	20	2	1		
12	7	5	9	7	2	0	0	2	14	11	17	33	1		

№	Использованы знаки								Рассеяние ЭВМ-решения, δ°			Число решений согласованных с LN, L Max		с SV, SH
	Всего				Не согласованы									
	P		S		P		S		T	N	P	13	14	
	+	-	SV	SH	+	-	SV	SH						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
13	9	2	9	5	0	1	2	2	28	27	17	339	1	
14	5	7	6	7	0	0	2	1	37	51	33	10	1	
15	8	9	19	18	1	1	0	0	30	31	33	7	1	
16	10	9	15	15	0	2	0	0	22	27	26	3	1	
17	10	7	10	8	0	1	3	4	14	20	16	5	1	
18	13	11	17	17	0	3	2	2	4	6	5	3	1	
19	8	5	6	6	0	0	0	0	15	12	12	3	2	
20	9	7	6	6	1	1	0	0	44	51	27	1	1	
21	10	5	6	6	0	2	0	0	36	38	30	22	2	
22	5	7	14	5	0	1	1	3	39	33	39	1	1	
23	10	11	13	5	0	2	0	0	7	7	7	15	1	
24	6	6	4	4	2	0	0	0	34	50	43	9	1	
25	7	8	4	4	1	2	0	0	1	2	2	3	3	
26	5	7	9	9	1	0	0	0	21	35	35	11	1	
27	8	7	6	5	0	1	1	2	30	27	19	91	1	
28	4	6	10	7	0	0	1	4	28	34	22	45	1	
29	6	4	5	8	1	0	3	0	13	21	21	360	1	

Примечание. Номера землетрясений в графе 1 соответствуют таковым в табл. 1.

Л и т е р а т у р а

1. Аптекман Ж.Я., Желанкина Т.С., Писаренко В.Ф., Поплавская Л.Н., Рудик М.И., Соловьев С.Л. 1979. Массовое определение механизмов очагов землетрясений на ЭВМ // Теория и анализ сейсмических наблюдений. М.: Наука. С. 45-58. (Вычислительная сейсмология; Вып. 12).
2. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. 1989. 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. С. 32-51.
3. Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. 1972. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука. 192 с.
4. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В., Фокина Т.А. 1997. Сейсмотектонические условия подготовки и возникновения Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 года // Очаги сильных землетрясений Дальнего Востока. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. С. 5-19. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; Т.V).
5. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В., Фокина Т.А. 1997. Сильные землетрясения в северной части Японского моря с гипоцентрами в земной коре, 1971-1993 гг. // Очаги сильных землетрясений Дальнего Востока. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. С. 5-19. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; Т.V).
6. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В. 1997. Динамические параметры очага, сейсмогенные подвижки и макросейсмический эффект Приморского землетрясения 13 ноября 1990 года // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. С. 39-44. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; Т.VI).
7. Поплавский А.А., Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В., Го Ч.Н., Рудик М.И. 1997. Сейсмотектонические условия возникновения очагов цунами в северной части Японского моря и Окуширское цунамигенное землетрясение 12 июля 1993 года // Проявление конкретных цунами. Цунами 1993-1994 гг. на побережье России. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. С. 29-44. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; Т.VIII).
8. Урбан Н.А., Рудик М.И., Шолохова А.А. 1998. Огоджанское землетрясение 5 марта 1987 года. Препр. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. 25 с.
9. Методика и результаты исследования динамики очагов сильных землетрясений Тихоокеанского побережья России. 1995. // Заключительный отчет ОНИР ИМГиГ ДВО РАН. №ГР01910023174. Инв. №02960004227. Руководитель – Иващенко А.И. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. Т.1. С. 12-39.
10. Иващенко А.И., Поплавская Л.Н., Ким Ч.У., Нагорных Т.В., Рудик М.И., Паршина А.И. 1998. Поле упругих напряжений и особенности проявления сейсмичности земной коры о. Сахалин и др. // Современная сейсмология: достижения и проблемы. Тезисы докл. М.: Наука. С. 22.
11. Иващенко А.И., Поплавская Л.Н., Ким Ч.У., Нагорных Т.В., Рудик М.И., Паршина А.И. 2000. Характер напряженного состояния и местоположение сильнейших землетрясений земной коры о. Сахалин // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВ ДВО РАН. С. 22-29.
12. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В. 2000. Сейсмогенные подвижки по активным разломам в очаговой области Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 года // Память и уроки Нефтегорского землетрясения. Тез. докл. (Южно-Сахалинск, 24-25 мая 2000 г.). М.: Изд-во ПОЛТЭКС. С. 162-164.
13. Урбан Н.А. (отв. сост.), Пиневиц М.В., Полякова Т.А. 1990. Сахалин // Землетрясения в СССР в 1987 году. М.: Наука. С. 244.
14. Поплавская Л.Н., Шолохова А.А., Урбан Н.А., Нагорных Т.В., Оскорбин Л.С., Рудик М.И. 1996. Приморское землетрясение 13 ноября 1990 г. // Землетрясения в СССР в 1990 году. М.: Наука. С. 75-79.
15. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Бойчук А.Н., Миталева Н.А., Оскорбин Л.С., Рудик М.И., Стрельцов М.И., Тихонов И.Н., Малышев А.И. 1989. Симуширское землетрясение 9 января 1989 года. Препр. Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН. 54 с.