

УДК 550.348.096.64

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ КАРПАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РЕШЕНИЯМИ ТЕНЗОРА МОМЕНТА ЦЕНТРОИДА

Степаненко Н. Я., Карданец В. Ю.

*Институт геологии и сейсмологии АН Молдовы, Кишинёв, Молдова
E-mail: seismolab@rambler.ru*

В статье приведены результаты решения механизмов 34 очагов землетрясений с $M_w \geq 4,4$, происшедших в 1977–2014 гг. и проявившихся в Молдове. Сделан сравнительный анализ механизмов очагов, выполненный по методу первого вступления P -волн и по методу тензора момента центроида (ТМЦ). Для сильнейших землетрясений – 4 марта 1977 г., 30 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г. – с помощью сравнительного анализа механизмов создана схема развития процесса разрываобразования, поскольку стандартное определение относится к началу процесса в очаге, а решение ТМЦ относится к моменту максимального выделения энергии. Для более полной характеристики напряженно-деформированного состояния среды рекомендовано применение обоих методов, дополняющих друг друга.

Ключевые слова: зона Вранча, механизм очага, напряжения, нодальная плоскость.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая опасность территории Республики Молдовы в значительной степени определяется влиянием промежуточных землетрясений области Вранча и коровыми землетрясениями, происходящими в юго-восточной части Румынии. Рассмотрим особенности механизмов землетрясений восточной части Карпатской зоны, решения которых получены двумя методами за период 1977–2014 гг.

Для построения механизмов очагов карпатских землетрясений использовалась стандартная методика [1], разработанная на основе теории дислокаций.

Исследование сделано в Институте геологии и сейсмологии Академии Наук Молдовы на основе данных о знаках первых вступлений короткопериодных продольных волн из бюллетеней сети сейсмических станций Молдовы и Украины Ученых записок Таврического национального университета имени В.И. Вернадского [2], информационных сообщений ИОЦ ГС РАН [3], Международного сейсмологического центра (ISC) [4] и данных Института физики Земли Румынии [5]. Углы выхода сейсмической радиации рассчитывались, исходя из Карпатского годографа. Решения опубликованы в работах [6, 7, 8, 9]. Для некоторых землетрясений использованы также определения других авторов.

Второй способ решения механизма очага получен с помощью тензора момента центроида по методу Дзевонского, изложенному в [10]. Как известно, тензор момента M зависит от силы источника и ориентации разрыва и содержит всю информацию об очаге, которую можно получить по наблюдениям длиннопериодных волн на телесеизмических станциях. Так как механизм, полученный по знакам первых вступлений, соответствует началу процесса

вспарывания, а главные оси тензора момента получены по всей сейсмограмме, то их сравнение может дать информацию о развитии процесса разрывообразования.

Сравнения определений тензора сейсмического момента, взятые из каталогов [4, 11], с полученными нами решениями, представляет большой интерес для рассмотрения развития процесса вспарывания и оценки применимости избранной нами модели для описания реальных процессов в очагах.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В задачу настоящей работы входило сопоставление результатов реконструкции поля тектонических напряжений в Карпатском регионе с использованием двух различных описанных методов, примененных к одним и тем же сильным землетрясениям. В таблицах 1, 2 приводятся параметры 34 очагов землетрясений, для которых приводятся решения механизмов как полученных по стандартной методике, так и рассчитанных по тензору момента центра ТМЦ. В таблице 1 даны магнитуды по продольным волнам mb и по поверхностным MS . Кроме того, приведены моментные магнитуды Mw . Четыре землетрясения были с магнитудой $6.3 \leq MS \leq 7.2$, а остальные – с $4.4 \leq MS \leq 5.8$. Полученные первым способом решения (Табл. 2) обеспечены более 50 знаками первых вступлений продольных P -волн. Коэффициент непротиворечивости знаков, которыми характеризуются сравниваемые землетрясения сравнительно высокие: 0.84 – 0.93. Следовательно, можно заключить, что сравнивались надежно полученные решения.

Параметры очагов для построенных нами механизмов MOLD и механизмов из каталога [12] совпадают с данными бюллетеня ISC [4].

Таблица 1.

Параметры землетрясений области Вранча за 1977–2014 гг.

№	Дата	Время ч м с	Координаты $\varphi^{\circ}, N \lambda^{\circ}, E$	Магнитуда	Глубина а км	Источник
1	2	3	4	5	6	7
1	04 03 1977	19 21 54	45.83 26.72	$mb = 6.4, MS = 7.2$	86	ISC[4]
		19 22 10	45.23 26.17	$mb = 6.4$	84	HRVD[4]
2	02 10 1978	20 28 52	45.72 26.54	$mb = 4.9$	161	ISC[4]
		20 28 52	45.70 26.70	$MS = 5.0$	140	[13]
		20 28 54	45.24 26.43	$mb = 5.0$	154	HRVD[4]
3	31 05 1979	07 20 06	45.63 26.47	$mb = 5.1$	130	ISC[4]
		07 20 06	45.60 26.40	$MS = 5.1$	120	[13]
		07 20 13	45.47 26.40	$mb = 5.1$	114	HRVD[4]
4	11 09 1979	15 36 54	45.59 26.31	$mb = 5.0$	154	ISC[4]
		15 36 54	45.60 26.50	$MS = 5.3$	158	[13]
		15 36 50	45.45 25.88	$mb = 5.1$	143	HRVD[4]
5	01 08 1985	14 35 00	45.73 26.52	$mb = 5.1$	105	ISC[4]
		14 35 03	45.76 26.52	$Mw = 5.0$	107	[14]
		14 35 06	45.77 26.95	$mb = 5.2$	103	HRVD[4]

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ
КАРПАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РЕШЕНИЯМИ ТЕНЗОРА ...

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
6	30 08 1986	21 28 36	45.52 26.49	MS = 7.1	131	[15]
		21 28 35	45.54 26.31	mb = 6.3	137	ISC[4]
		21 28 35	45.64 26.38	mb = 6.6. MS = 6.9	132	MOS[4]
		21 28 35	45.55 26.32	mb = 6.4. MS = 6.9	132	NEIS[4]
		21 28 51	45.76 26.53	mb = 6.3. Mw = 7.2	133	HRVD[4]
7	30 05 1990	10 40 06	45.85 26.66	mb = 6.4	89	[12]
		10 40 06	45.88 26.67	MS = 7.3	90	[16]
		10 40 06	45.90 26.66	mb = 6.7	84	MOS[4]
		10 40 06	45.84 26.67	mb = 6.7	89	NEIC[4]
		10 40 13	45.92 26.81	mb = 6.7. Mw = 6.9	74	HRVD[4]
8	31 05 1990	00 17 48	45.81 26.77	mb = 5.9	90	[12]
		00 17 48	45.81 26.77	mb = 6.1	88	NEIC[4]
		00 17 45	45.67 26.00	Mw = 6.3	87	HRVD[4]
9	13 03 1998	13 14 38	45.57 26.26	mb = 4.7	156	ISC[4]
		13 14 43	45.61 26.30	mb = 5.0	151	HRVD[4]
10	28 04 1999	08 47 55	45.48 26.22	mb = 5.1	150	ISC[4]
		08 47 58	45.51 26.08	mb = 5.1	144	HRVD[4]
		08 47 56	45.49 26.27	Mw = 5.0	159	[17]
11	06 04 2000	00 10 39	45.73 26.58	mb = 4.9	137	ISC[4]
		00 10 42	45.61 26.56	Mw = 5.2	122	HRVD[4]
		00 10 39	45.74 26.58	Mw = 5.4	150	CSEM[4]
		00 10 38	45.72 26.58	mb = 5.0	135	NEIC[4]
12	24 05 2001	17 34 01	45.69 26.42	mb = 4.8	144	ISC[4]
		17 34 06	45.87 26.49	Mw = 5.2	139	HRVD[4]
		17 34 07	45.74 26.62	mb = 5.1	143	MED[4]
		17 34 01	45.74 26.40	mb = 5.1	144	ZUR[4]
13	20 07 2001	05 09 40	45.74 26.71	mb = 4.9	127	ISC[4]
		05 09 44	45.66 26.73	mb = 4.8	134	HRVD[4]
		05 09 46	45.88 26.82	Mw = 4.8	125	MED[4]
		05 09 39	45.74 26.73	Mw = 4.8	129	ZUR[4]
14	30 11 2002	08 15 47	45.69 26.50	mb = 5.0	172	ISC[4]
		08 15 46	45.73 26.57	Mw = 4.8	156	ZUR[4]
		08 15 47	45.65 26.80	Mw = 5.0	171	MED[4]
15	05 10 2003	21 38 17	45.65 26.32	mb = 4.5	152	ISC[4]
		21 38 17	45.67 26.33	Mw = 4.5	153	ZUR[4]
		21 38 17	45.59 26.43	Mw = 4.4	144	MED[4]
16	27 09 2004	09 16 23	45.67 26.43	mb = 4.8	151	ISC[4]
		09 16 24	45.74 26.56	Mw = 4.8	154	HRVD[4]
		09 16 23	45.64 26.60	Mw = 4.8	146	MED[4]
		09 16 23	45.70 26.48	Mw = 4.8	150	ZUR[4]
17	03 10 2004	09 02 01	45.18 28.94	MS = 4.1 mb = 5.0	8	ISC[4]
		09 02 07	45.20 28.56	Mw = 4.8	12	HRVD[4]
		09 02 07	45.18 29.07	Mw = 4.7	17	MED[4]
		09 02 06	45.20 28.97	Mw = 4.7	9	ZUR[4]
18	27 10 2004	20 34 36	45.78 26.58	mb = 5.6	98	ISC[4]
		20 34 37	45.73 26.67	Mw = 5.8	94	HRVD[4]
		20 34 37	45.79 26.62	mb = 5.8 Mw = 5.9	96	NEIC[4]
		20 34 36	45.79 26.62	Mw = 5.8	78	ZUR[4]
		20 34 33	45.65 26.79	Mw = 5.9	96	MED[4]

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
19	14 05 2005	01 53 21	45.68 26.44	mb = 5.1	149	ISC[4]
		01 53 21	45.67 26.48	Mw = 5.2	139	HRVD[4]
		01 53 20	45.68 26.44	Mw = 5.3	135	ZUR[4]
		01 53 20	45.71 26.59	Mw = 5.2	137	MED[4]
20	18 06 2005	15 16 41	45.74 26.68	mb = 4.9	138	ISC[4]
		15 16 42	45.67 26.50	Mw = 5.0	138	HRVD[4]
		15 16 42	45.71 26.70	Mw = 5.0	144	ZUR[4]
		15 16 42	45.71 26.69	Mw = 5.0	138	MED[4]
21	13 12 2005	12 14 45	45.72 26.63	mb = 4.6	134	ISC[4]
		12 14 42	45.82 26.69	Mw = 4.8	138	HRVD[4]
		12 14 44	45.78 26.79	Mw = 4.8	125	ZUR[4]
		12 14 42	45.66 26.75	Mw = 4.8	132	MED[4]
22	25 04 2009	17 18 48	45.70 26.54	mb = 5.3	102	ISC[4]
		17 18 53	45.64 26.73	Mw = 5.2	90	HRVD[4]
		17 18 47	45.74 26.73	Mw = 4.4	75	ZUR[4]
		17 18 48	45.72 26.80	Mw = 5.2	86	MED[4]
		17 18 50	45.59 26.71	Mw = 5.2	107	GCMT[4]
		17 18 48	45.65 26.60	Mw = 5.3	100	NEIC[4]
23	08 06 2010	15 16 10	45.62 26.38	mb = 4.4	115	ISC[4]
		15 16 12	45.57 26.42	Mw = 4.3	103	HRVD[4]
		15 16 10	45.72 26.73	Mw = 4.3	98	MED[4]
24	30 09 2010	05 31 23	45.55 26.34	mb = 4.3	141	ISC[4]
		05 31 22	45.50 26.31	Mw = 4.4	162	MED[4]
25	01 05 2011	02 24 16	45.62 26.42	mb = 4.6	140	ISC[4]
		02 24 15	45.61 26.49	Mw = 4.8	137	MED[4]
		02 25 04	45.58 26.46	Mw = 4.8	133	GFZ[4]
26	04 10 2011	02 40 48	45.58 26.46	mb = 4.6	136	ISC[4]
		02 40 46	45.50 26.58	Mw = 4.7	137	MED[4]
27	06 07 2012	22 48 00	45.74 26.65	mb = 4.4	111	ISC[4]
		22 48 00	45.68 26.67	Mw = 4.4	127	MED[4]
		22 48 00	45.68 26.67	mb = 4.4	113	NEIC[4]
28	01 12 2012	20 52 07	45.79 26.74	mb = 4.7	90	ISC[4]
		20 52 07	45.75 26.76	Mw = 4.3	76	MED[4]
29	06 10 2013	01 37 21	45.64 26.69	mb = 5.3	134	ISC[4]
		01 37 20	45.68 26.54	mb = 5.4	131	MOS[18]
		01 37 23	45.67 26.55	Mw = 5.3	120	GFZ[18]
		01 37 23	45.62 26.71	Mw = 5.3	133	USGS[18]
		01 37 21	45.66 26.68	Mw = 5.3	103	MED[4]
		01 37 21	45.66 26.59	Mw = 5.3	130	GCMT[4]
30	15 10 2013	19 13 12	45.60 26.59	ml = 4.9	138	ISC[4]
		19 13 12	45.60 26.55	Mw = 4.7	141	MED[4]
		19 18 05	45.61 26.47	ML = 5.0	134	BUC[5]
		19 18 07	45.55 26.57	Mw = 4.7	125	GCMT[4]
		19 18 05	45.72 26.60	Mw = 4.7	121	MED[4]
		19 18 05	45.68 26.48	Mw = 4.7	111	GFZ[4]
		19 45 57	45.59 26.46	ML = 4.8	105	BUC[5]
		19 46 08	45.70 26.50	Mw = 4.5	112	GFZ[4]
31	29 03 2014	19 45 58	45.60 26.45	Mw = 4.4	106	MED[4]
		19 18 05	45.61 26.47	ML = 5.0	134	BUC[5]
		19 18 07	45.55 26.57	Mw = 4.7	125	GCMT[4]
		19 18 05	45.72 26.60	Mw = 4.7	121	MED[4]
		19 18 05	45.68 26.48	Mw = 4.7	111	GFZ[4]
32	10 09 2014	19 45 57	45.59 26.46	ml = 4.8	105	BUC[5]
		19 46 08	45.70 26.50	Mw = 4.5	112	GFZ[4]
		19 45 58	45.60 26.45	Mw = 4.4	106	MED[4]
33	22 11	19 14 17	45.86 27.15	ml = 5.7	41	BUC[5]

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ
КАРПАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РЕШЕНИЯМИ ТЕНЗОРА ...

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
	2014	19 14 13	45.89 27.23	MS = 5.5 mb = 5.7	40	ИОЦ ГС РАЦ[18]
		19 14 17	45.86 27.16	Mw = 5.5 mb = 5.6	41	NEIC[18]
		19 14 17	45.86 27.16	Mw = 5.6	43	IPGP[18]
		19 14 17	45.80 27.30	Mw = 5.6	31	INGV[18]
		19 14 17	45.91 27.24	Mw = 5.8	16	MED[4]
		19 14 18	45.80 27.17	Mw = 5.7	25	GCMT[4]
34	07 12	21 04 05	45.88 27.17	ml = 4.5	40	BUC[5]
	2014	21 04 05	45.84 27.18	Mw = 4.4	32	MED[4]

Таблица 2.

Параметры механизмов очагов землетрясений области Вранча за 1977 – 2014 гг.

№	Дата	Нодальные плоскости						Оси главных напряжений						Источник
		NP1			NP2			P		N		T		
		Stk	Dp	Slip	Stk	Dp	Slip	Az	Pl	Az	Pl	Az	Pl	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	04 03 1977	222	71	99	20	20	69	307	25	40	8	147	64	[20]
		235	62	92	50	28	86	323	17	54	2	151	73	HRVD
2	02 10 1978	122	37	71	325	55	104	45	9	137	11	278	75	[12]
		131	34	8	316	56	93	44	11	134	3	236	79	[13]
		140	39	85	326	51	94	53	6	144	3	263	83	HRVD
3	31 05 1979	235	68	47	123	47	149	354	12	254	39	98	48	[12]
		233	80	65	124	27	159	343	31	238	25	116	49	[13]
		221	85	92	23	6	72	309	40	41	2	133	50	HRVD
4	11 09 1979	276	45	45	27	71	49	145	16	42	38	264	48	[12]
		210	13	107	12	77	86	105	32	13	4	278	58	[13]
		202	29	70	45	63	101	127	17	220	10	338	70	HRVD
5	01 05 1985	282	67	42	172	52	150	44	10	395	43	143	45	[12]
		200	76	150	298	61	16	252	10	358	57	156	31	[14]
		288	9	-14	32	88	-98	293	46	32	8	130	42	HRVD
6	30 08 1986	245	69	102	35	24	62	326	23	61	11	174	64	[12]
		233	65	92	49	25	87	322	20	52	1	146	70	[15]
		242	62	100	40	30	70	324	17	56	11	176	71	MOS
		230	70	69	98	29	35	336	22	222	8	110	60	NEIC
7	30 05 1990	240	72	97	39	19	70	324	27	58	6	160	63	HRVD
		221	63	88	46	27	94	312	18	222	2	126	72	[12]
		231	71	96	32	20	72	316	26	49	6	151	63	[16]
		232	58	108	20	36	63	309	11	42	15	184	71	MOS
8	31 05 1990	218	62	82	55	29	105	314	17	222	7	110	72	NEIC
		236	63	101	33	29	70	318	17	51	9	168	70	HRVD
		93	23	58	307	71	102	27	25	123	12	236	62	[12]
		130	20	90	310	70	90	25	40	130	0	220	65	NEIC
9	13 03 1998	90	26	54	309	69	106	27	22	123	15	244	63	HRVD
		274	40	136	42	64	58	152	13	56	26	264	60	*
		227	12	96	42	78	89	133	33	42	1	310	57	HRVD
10	28 04 1999	164	57	96	332	34	80	248	10	340	6	92	78	*
		166	54	88	350	36	93	258	9	2	2	80	66	HRVD
		171	53	106	325	40	69	249	5	340	13	122	78	[17]
11	06 04 2000	226	70	93	39	20	83	314	25	56	3	141	65	*
		238	81	106	356	18	29	315	34	56	16	167	51	HRVD
		232	79	81	92	14	129	330	33	234	9	131	55	CSEM
12	24 05 2001	223	78	96	18	14	66	308	32	42	6	140	57	NEIC
		205	52	93	18	38	86	292	6	23	3	118	84	*

13	20 07 2001	206	60	104	1	33	67	288	14	21	43	150	71	HRVD
		201	60	103	356	62	69	282	14	15	11	141	72	MED
		204	57	100	7	34	78	287	12	19	8	143	76	ZUR
		120	50	96	299	40	86	206	5	296	4	78	84	*
		17	48	162	119	77	44	242	18	132	45	347	39	HRVD
		182	55	92	358	35	87	270	10	1	2	102	80	ZUR
		5	31	100	173	59	84	268	14	176	5	67	75	MED

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
14	30 11 2002	150	80	-105	26	18	-36	40	52	154	14	254	34	*
		151	75	-100	3	18	-59	47	59	153	9	248	29	ZUR
		147	88	-104	51	14	-7	43	45	148	14	251	42	MED
15	05 10 2003	274	50	126	26	64	44	147	9	68	28	248	47	*
		208	33	106	9	58	80	106	13	14	9	251	74	ZUR
		225	38	123	05	59	67	111	11	17	20	228	67	MED
16	27 09 2004	274	44	123	52	56	62	162	6	70	23	262	68	*
		198	40	75	37	52	102	118	6	210	10	357	79	HRVD
		238	30	95	52	60	87	144	15	54	2	315	74	ZUR
		223	37	39	57	53	98	141	8	232	7	28	80	MED
17	03 10 2004	159	64	-46	274	50	-148	120	48	220	40	224	6	*
		152	70	-72	289	27	-129	88	61	325	17	228	23	HRVD
		123	45	-90	303	45	-90	88	90	303	0	213	0	ZUR
		116	47	-100	311	44	-79	317	82	123	7	213	2	MED
18	27 10 2004	157	46	104	317	46	76	237	1	328	10	147	81	*
		335	19	27	219	81	107	294	34	37	17	149	51	HRVD
		310	24	13	208	85	114	278	35	26	23	142	45	NEIC
		14	14	66	219	77	96	304	32	38	6	137	58	ZUR
		47	86	-94	268	6	-50	313	49	47	4	141	41	MED
19	14 05 2005	183	40	86	08	50	94	93	5	186	3	292	84	*
		183	50	71	31	44	111	286	3	196	14	29	76	HRVD
		192	47	78	30	45	103	291	1	201	9	28	81	ZUR
		188	49	68	39	45	114	293	2	202	16	31	73	MED
20	18 06 2005	107	44	95	275	40	80	192	6	282	6	38	82	*
		112	58	90	293	32	90	203	13	113	0	22	77	HRVD
		114	65	91	293	25	88	204	20	294	1	26	79	ZUR
		111	62	93	285	28	84	199	17	290	3	28	73	MED
21	13 12 2005	253	60	100	56	30	76	336	16	67	8	184	73	*
		219	76	112	339	26	33	292	28	34	22	156	53	HRVD
		239	80	112	358	15	39	309	33	48	11	154	53	ZUR
		221	81	104	343	17	33	299	34	39	14	148	52	MED
22	25 04 2009	237	40	78	74	50	102	156	6	246	8	36	79	*
		233	42	73	76	51	105	156	5	246	11	44	78	HRVD
		243	46	82	75	44	98	339	0	249	5	76	84	ZUR
		230	46	77	68	46	102	149	0	239	9	58	81	GCMT
		249	39	71	93	53	105	172	7	264	11	270	52	NEIC
		235	43	74	76	49	104	156	3	247	11	49	79	MED
23	08 06 2010	128	46	106	287	46	74	207	1	298	11	130	80	*
		140	45	85	327	46	95	53	0	143	4	317	86	HRVD
		211	49	54	79	53	124	145	2	237	26	51	64	MED
24	30 09 2010	274	44	94	86	44	84	359	0	90	4	270	88	*
		299	50	95	111	40	84	25	5	116	4	240	84	MED
25	01 05 2011	153	62	64	22	38	130	262	14	167	24	20	62	*
		170	63	68	31	34	126	275	15	180	19	41	65	MED
		165	54	73	12	40	111	267	8	176	14	38	76	GFZ
26	04 10 2011	196	46	98	6	44	84	280	1	10	5	182	86	*

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ
КАРПАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РЕШЕНИЯМИ ТЕНЗОРА ...

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		203	48	102	5	43	77	284	3	15	9	178	81	MED
27	06 07 2012	233	60	94	67	32	85	328	14	236	6	120	76	*
		261	70	109	36	28	49	335	22	74	18	199	61	MED
		281	59	84	112	32	100	15	13	284	5	173	76	NEIC
28	01 12 2012	233	60	93	46	30	86	320	15	42	4	150	76	*
		201	46	48	73	57	125	139	6	232	29	38	61	MED
29	06 10 2013	217	60	98	20	32	82	302	15	33	8	148	74	MOLD
		226	58	91	43	32	88	315	13	45	1	140	77	MOS
		228	53	95	40	37	84	315	8	45	4	160	81	USGS
		229	50	94	42	40	85	316	5	46	3	169	84	GCMT
		233	52	92	50	38	88	321	17	51	1	153	83	MED
		232	49	84	61	41	97	326	4	236	5	97	84	GFZ
30	15 10 2013	217	67	104	27	23	69	312	21	35	4	154	58	*
		185	59	70	39	36	119	289	12	195	17	52	69	MED
		184	50	86	10	40	110	277	5	186	4	94	85	*
31	29 03 2014	211	59	95	22	31	82	298	14	29	4	134	76	GCMT
		198	53	81	33	37	102	295	8	204	7	73	79	MED
		198	55	100	1	37	76	281	9	12	8	144	78	GFZ
		296	63	104	89	30	66	16	14	109	13	238	70	БUC
32	10 09 2014	288	59	98	93	32	78	16	15	102	6	196	76	GFZ
		288	70	107	67	26	51	5	23	102	16	224	61	MED
		134	76	-86	295	15	-106	50	60	311	5	220	30	БUC
33	22 11 2014	138	58	-39	251	58	-141	105	49	284	41	14	0	ЮЦГСПАН
		148	80	-44	248	47	-166	98	37	318	45	205	21	NEIC
		148	89	-57	238	33	-179	82	45	304	30	215	36	IPGP
		140	82	-72	247	30	-162	82	56	316	78	210	30	INGV
		140	84	-74	249	17	-160	67	48	318	16	216	37	GCMT
		144	87	-80	252	11	-162	65	47	324	10	225	41	MED
34	07 12 2014	130	59	-78-	289	33	-108	68	72	304	10	212	14	БUC
		148	75	-56	259	37	-154	95	49	318	33	213	23	MED

Звездочкой обозначены решения MOLD

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ

Рассмотрим сначала решения механизмов очагов сильнейших сейсмических событий 4 марта 1977 г., 30 августа 1986 г., 30 и 31 мая 1990 г.

Землетрясение 4 марта 1977 г. было мультипланетным и состояло из нескольких последовательных разрывов. Эпицентр приурочен к северо-восточной части области Вранча. Распределение знаков вступлений первичных волн на стереографической проекции таково, что нет возможности однозначно разделить их двумя нодальными плоскостями. Имеется два варианта решения механизма: по близким сейсмическим станциям и короткопериодной аппаратуре и по удаленным станциям и длиннопериодной аппаратуре. Вступления, зарегистрированные короткопериодной аппаратурой, расположенной вблизи очага, соответствует дискретному толчку, составляющему очаг. Для записей длиннопериодной аппаратурой на расстоянии от очага много больше его размера эффект дискретности исчезает, сейсмический сигнал сглаживается, и решение механизма определяет осредненный разрыв. На рисунке 1 приведено решение, полученное румынским сейсмологом Энеску по знакам первых вступлений *P*-волн, взятых только по

длиннопериодной аппаратуре [20]. В этом случае ось напряжения сжатия близгоризонтальна и ориентирована в северо-западном направлении. Ось напряжения растяжения близвертикальна. Одна из двух альтернативных плоскостей разрыва крутая, другая более пологая, простирание обеих юго-запад – северо-восток, характер движения взбросо-сдвиговый. На рисунке 1 также показана стереограмма механизма очага 4 марта 1977 г, выполненные по второму методу HRVD.

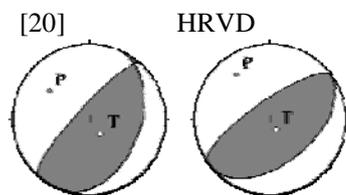


Рис. 1. Стереогаммы механизма очага землетрясения 4 марта 1977 года в проекции нижней полусферы (зачернены области сжатия). 1 – *нодальные линии*, 2, 3 – *оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно*; зачернены области волн сжатия: 1 – \backslash ; 2 – \bullet ; 3 – \circ .

О направленности распространения разрыва в очаге можно судить по координатам очага из таблицы 1, относящимся к начальному моменту процесса, и полученным по методу ТМЦ [4]. Эпицентр землетрясения 1977 г., определённый по методу ТМЦ, смещён от эпицентра, соответствующего началу вспарывания, на 70-75 км к юго-западу (Рис. 2). На рисунке 2 пунктиром показана линия развития процесса разрывообразования и отмечены координаты четырёх основных составляющих этого мультиплетного события по [19].

Несовпадение эпицентров объясняется тем, что второе решение относится к одному из последующих этапов развития процесса разрывообразования, поскольку для нахождения элементов тензора момента центра используется вся сейсмограмма землетрясения, которая в процессе расчёта усредняется. Характер подвижки, взбросо-сдвиговый, остаётся сходным при разных определениях.

Далее следует землетрясение 30 августа 1986 г. (Рис. 3). Гипоцентр события 30 августа 1986 г. приурочен к юго-западной окраине области Вранча и глубине порядка 130 км. Механизмы очага землетрясения 1986 г., определённые первым [12, 13] и вторым методом [4], хорошо согласуются между собой. Обе возможные плоскости разрыва имеют северо-восточное простирание. Одна из плоскостей крутая, другая пологая. Подвижки по ним представлены надвигом с небольшой компонентой левостороннего $NP1$ и правостороннего $NP2$ сдвигов. Ось растягивающего напряжения T почти вертикальна, сжимающего P – близгоризонтальна и ориентирована в северо-западном направлении.

По геолого-геофизическим соображениям за действующую плоскость разрыва в очаге можно принять крутую плоскость $NP1$, совпадающую с направлением протяжённости зоны максимального балла и зоны афтершоков. По этой плоскости

северо-западный борт разрыва надвинут на юго-восточный в соответствии с тем, что продолжается вздымание горного сооружения Карпат и надвигание Восточно-Карпатской дуги на Предкарпатский прогиб.

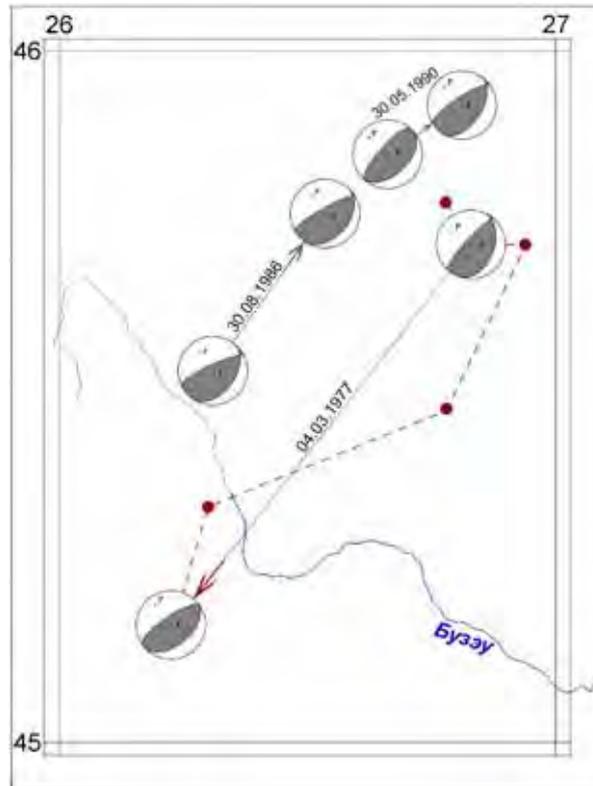


Рис. 2. Сравнение разных определений эпицентра и механизма землетрясений 4 марта 1977 г., 30 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г. Точками обозначены эпицентры основных толчков землетрясения 1977 г.

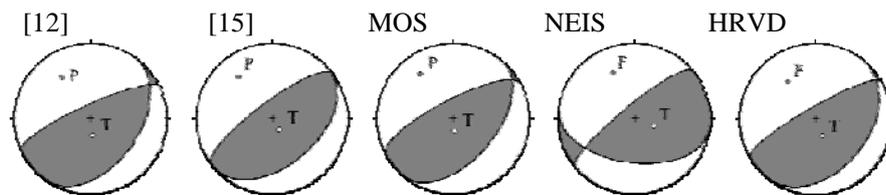


Рис. 3. Землетрясение 30 августа 1986 г.

О направленности разрыва можно судить, исходя из того, что эпицентр, определённый по методу ТМЦ, смещён по отношению к эпицентру по первому способу на 25–30 км (Рис. 2). Отсюда можно сделать предположение, что разрыв в очаге распространялся с юго-запада на северо-восток. Это согласуется с макросейсмическими данными, которые подтверждают асимметричность затухания макросейсмического эффекта в этих направлениях. Так, в Бухаресте на расстоянии 140 км к юго-западу от эпицентра ощущалось землетрясение интенсивностью 6 – 7 баллов. В Кишинёве на расстоянии 240 км к северо-востоку от эпицентра интенсивность составила также 6 – 7 баллов.

В 1990 г. произошёл сейсмический дубль 30 и 31 мая. Местоположение очагов близко к таковому для землетрясения 1977 г. Механизм очага 30 мая наиболее энергетически мощного события по данным [12, 16] и MOS схож с механизмами 1977 и 1986 гг. Тип движения в очаге взбросо-сдвиговый. Одна из двух возможных плоскостей разрыва крутая, другая более пологая. Простираение нодальных плоскостей по касательной к Карпатской дуге. Определение решений механизма очага на основе знаков первых вступлений *P*-волн и по методу ТМЦ (HRVD, NEIC) дали достаточно близкие результаты, что свидетельствует об унаследовании направления вспарывания на разных стадиях образования разрыва (Рис. 4). Смещение эпицентра, определённого по методу ТМЦ, наблюдается к северо-востоку на расстояние порядка 15 км, глубина очага уменьшается от 89 до 74 км (Рис. 2).

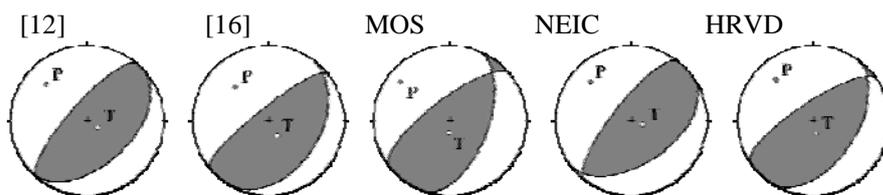


Рис. 4. Землетрясение 30 мая 1990 г.

Имеются решения механизма очага землетрясения 31 мая 1990 г. по методу двойного диполя [12] и ТМЦ, которые хорошо согласуются между собой (Рис. 5).

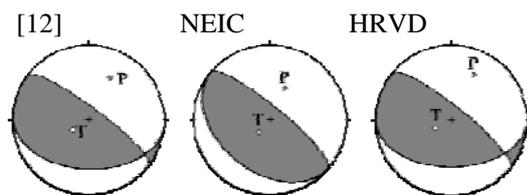


Рис. 5. Землетрясение 31 мая 1990 г.

Одна пологая нодальная плоскость ориентирована в субширотном направлении, вторая альтернативная плоскость крутого падения ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток. Направление оси сжатия северо-восточное.

Время в очаге землетрясения во втором способе решения – это среднее время центра, которое запаздывает относительно t_0 тем сильнее, чем выше магнитуда землетрясения.

При рассмотрении разницы во времени и координат эпицентра землетрясения 31 мая оказалось, что время в очаге по HRVD взято на 3 секунды раньше определений ISC, поэтому и координаты эпицентра получились выходящими за пределы области Вранча.

Далее рассмотрим особенности решения механизмов очагов менее сильных промежуточных землетрясений, выполненных на основе двух разных способов.

Очаг землетрясения 2 октября 1978 г. приурочен к нижнему ярусу глубин – порядка 155 км. Надёжность определения механизма очага зависит от количества станций с известным направлением первого вступления, а также от расположения этих станций по отношению к эпицентру. Для землетрясения 2 октября эти условия довольно благоприятны, и механизм его может быть определён достаточно уверенно. Получено решение механизма очага по 98 знакам, 15 несогласующихся знаков в [12] и 108/5 в [13]. Одна из плоскостей имеет характер надвига с левосторонним сдвигом, вторая – с правосторонним сдвигом.

Имеется решение механизма очага по второму методу (HRVD). Оба решения близки между собой (Рис. 6). Плоскости разрыва ориентированы параллельно Восточным Карпатам. Ось близгоризонтального сжатия ориентирована в направлении северо-восток – юго-запад.

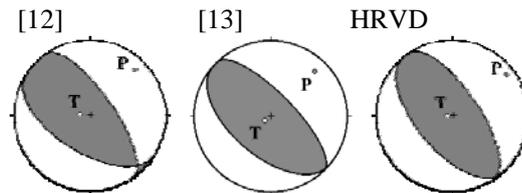


Рис. 6. Землетрясение 2 октября 1978 г.

Далее рассмотрим землетрясение 31 мая 1979. Имеется 2 близких решения классическим методом [12, 13] (Рис. 7). Тип движения вдоль первой плоскости – левосторонний взбросо-сдвиг, компонента по простиранию преобладает. Сильный макросейсмический эффект в направлении на северо-восток от эпицентра согласуется с ориентацией плоскости разрыва $NP1$. Согласно решению HRVD, крутая плоскость диагонального простирания близка по ориентации с решениями по первому способу. Вторая плоскость пологая, оси сжатия и растяжения наклонные. Глубина очага по первому вступлению волн P – 130 км, по второму решению HRVD – 114 км. Время в очаге по второму способу на 7 секунд больше, чем по данным ISC.

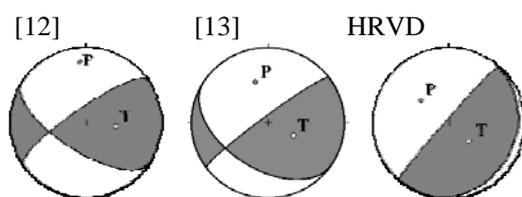


Рис. 7. Землетрясение 31 мая 1979

Очаг землетрясения 11 сентября 1979 г. приурочен к юго-западной окраине области Вранча и к нижнему этажу глубин порядка 150 км. По первому методу имеется 2 решения механизма очага [12, 13]. Согласно решению [12] первая плоскость – правосторонний взбросо-сдвиг, вторая плоскость – левосторонний взбросо-сдвиг. Рабочая нодальная плоскость параллельна простиранию Южных Карпат. Во втором решении [13] нодальные плоскости диагонального простирания. Одна из них пологая, другая крутая.

Решение по методу ТМЦ (HRVD) сходно с вариантом [13] (Рис. 8). При рассмотрении разницы во времени и координат эпицентра землетрясения 11 сентября оказалось, что время в очаге по HRVD взято неверно (на 4 секунды раньше определений ISC), поэтому и координаты эпицентра получились выходящими за пределы области Вранча.

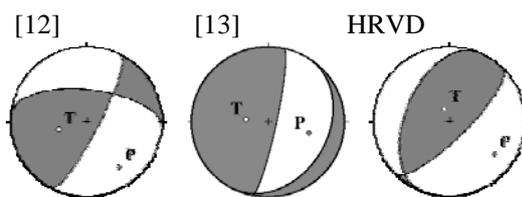


Рис. 8. Землетрясение 11 сентября 1979 г.

1 августа 1985 г. произошёл сейсмический дубль с интервалом в 3 часа. Направление простирания плоскости разрыва при первом событии дубля близко к простиранию очаговой области Вранча. Решение по методу ТМЦ в каталогах не приводится.

Для второго события сейсмического дубля имеются решения [12, 14], а также HRVD (Рис. 9). В полученных первым способом решениях одна из крутых плоскостей диагонального простирания. Другая плоскость ориентирована субгоризонтально. Большой вклад вносит сдвиговая составляющая. Согласно решению HRVD в очаге произошла сбросовая подвижка. Максимальное выделение энергии произошло на 33 км к востоку по отношению к эпицентру начала процесса разрывообразования, такое расстояние нам представляется завышенным. Эпицентр по HRVD выходит за пределы очаговой области.

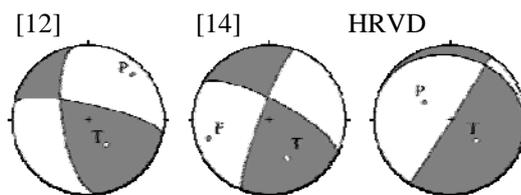


Рис. 9. Второе событие сейсмического дубля 1 августа 1985 г.

Магнитуда несколько выше у второго толчка дубля, а макросейсмический эффект в Молдове существенно меньше. Следовательно, особенности проявления дубля на земной поверхности обусловлены в значительной степени механизмом очага и направленностью излучения энергии.

На рисунке 10 показаны механизмы очага землетрясения 13 марта 1998, которое произошло в юго-западной части Вранча на глубине более 150 км. Знаки первых вступлений волн *P* хорошо разделяются нодальными плоскостями. Пологая плоскость ориентирована широтно, как и ось промежуточного напряжения *N*. Другая крутая плоскость диагональной ориентации. Ось сжатия направлена субмеридионально. Механизм очага носит надвиговый характер в соответствии с надвиганием Южных Карпат на Предкарпатье.

Кроме этого имеется решение механизма HRVD (Рис. 10). Оси сжатия и растяжения наклонные, обе нодальные плоскости имеют близкое, северо-восточное – юго-западное простирание. Движение по пологой наклонной плоскости представлено надвигом, по крутопадающей плоскости – взбросом. Время в очаге на 5 секунд больше, чем в каталоге ISC.

При сравнении двух решений механизма очага 13 марта видно, что вторые из двух альтернативных крутых плоскостей близки по ориентации, а первые отличаются.

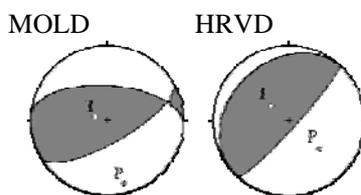


Рис. 10. Землетрясение 13 марта 1998 г.

Землетрясение 28 апреля 1999 г. произошло в юго-западной окраине фокальной зоны на глубине порядка 150 км. Согласно решениям первым (MOLD) и вторым (HRVD, [17]) способами, землетрясение произошло под действием горизонтальных сил сжатия, ориентированных в близширотном направлении (Рис. 11). Тип подвижки в очаге – надвиговый. Простирание обеих нодальных плоскостей субмеридиональное.

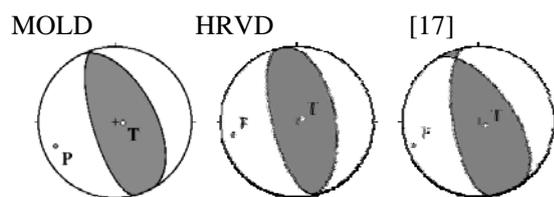


Рис. 11. Землетрясение 28 апреля 1999 г.

Использованные для построения механизма очага 6 апреля 2000 г. знаки первых вступлений продольных волн хорошо разделились (98/5). Полученный механизм очага находится в согласии с механизмами ТМЦ, представленными агентствами HRVD, CSEM, NEIC (Рис. 12). Наблюдается наклонная ориентация осей напряжений, причём ось растяжения *P* направлена ближе к вертикали. Одна нодальная плоскость пологая, другая крутая, и по ней, по-видимому, произошла подвижка взбросового типа.

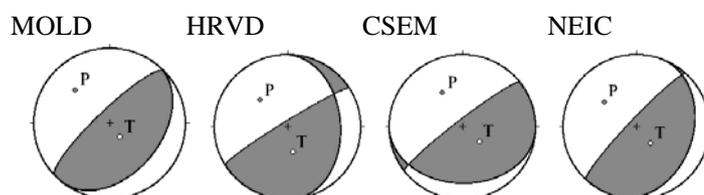


Рис. 12. Землетрясение 6 апреля 2000 г.

Очаг землетрясения 24 мая 2001 г. приурочен к центральной части Вранча и глубине порядка 145 км. Противоречивых первому решению знаков мало (85/6). Необычно для вранчских землетрясений большое количество станций со знаками разрезания (23 с – 62 d). Имеется несколько вариантов решения механизма очага вторым способом (Рис. 13), которые хорошо согласуются между собой. По всем решениям крутая нодальная плоскость диагонального простирания, ось сжатия близгоризонтальна и направлена на северо-запад. Однако по данным MED начало разрыва не совпадает с другими определениями, опережает их на несколько секунд, отличаются и координаты эпицентра.

Землетрясение 20 июля 2001 г. произошло в северо-восточной части области Вранча на глубине порядка 120 км. Механизм очага по методу первого вступления характеризуется сжатием в юго-западном направлении и надвиганием юго-западного борта разрыва – на северо-восточный. Есть решения HRVD, MED, ZUR (Рис. 14). Решение по первому методу ближе всего согласуется с Гарвардским. Для решения MED время в очаге отличается на 6 секунд от времени по ISC, отличаются и координаты. По данным ZUR время в очаге опережает время по другим агентствам.

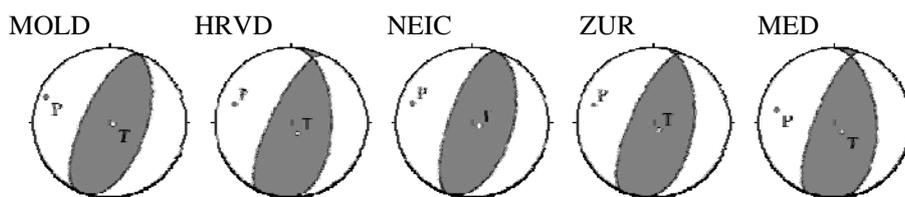


Рис. 13. Землетрясение 24 мая 2001 г.

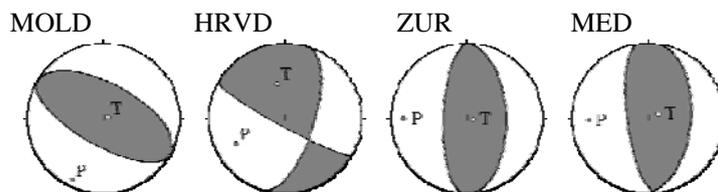


Рис. 14. Землетрясение 20 июля 2001 г.

Землетрясение 30 ноября 2002 г. произошло на глубине порядка 170 км в центральной части очаговой зоны. Имеется одно решение по первому методу, знаки плохо разделяются на стереографической плоскости (79/15). Приводятся 2 решения по второму методу (ZUR, MED) (Рис. 15). Все три решения практически совпадают. Согласно им, напряжения сжатия и растяжения наклонны к горизонту. Подвижка в очаге по плоскости $NP1$ – сброс с компонентами сдвига, по $NP2$ – сдвиг с компонентами сброса. Такой тип механизма является нетипичным для области Вранча. Аномально большой явилась и глубина очага события 30 ноября 2002 г.

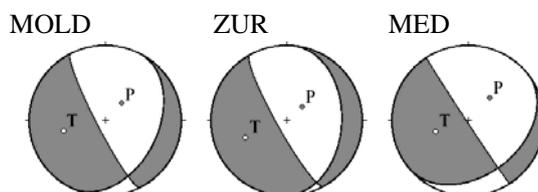


Рис. 15. Землетрясение 30 ноября 2002 г.

Очаг землетрясения 5 октября 2003 г. относится к юго-западной окраине Вранча и глубине порядка 150 км. Мы построили решение механизма очага землетрясения по 52/4 знакам. Северный борт разрыва надвигается на южный.

Имеется два решения по методу ЦМТ (ZUR, MED) (Рис. 16). Здесь вторые плоскости близки с нашим решением. Первая плоскость ориентирована диагонально. Ось сжатия близширотна.

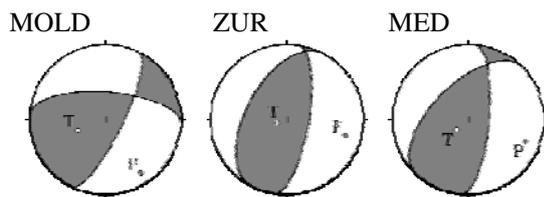


Рис. 16. Землетрясение 5 октября 2003 г.

Землетрясение 27 сентября 2004 г. в районе Вранча произошло в центральной части на глубине около 150 км и ощущалось на значительной части Молдовы. Возможно, оно спровоцировало месяцем спустя 27 октября разрядку накопившихся напряжений и в верхней части глубин фокальной зоны Вранча ($h \sim 100$ км).

Есть определения механизма очага как по стандартной методике, так и по тензору момента центроида: HRVD, ZUR, MED (Рис. 17).

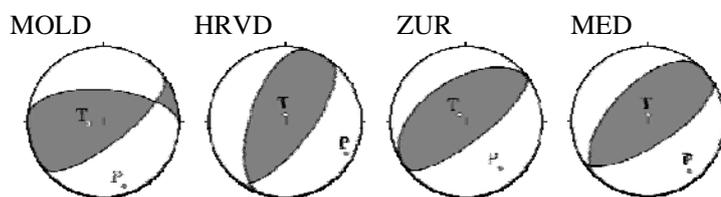


Рис. 17. Землетрясение 27 сентября 2004 г.

Согласно решениям механизма очага MOLD нодальная плоскость $NP1$ ориентирована близширотно, плоскость $NP2$ – на северо-восток. Обе плоскости достаточно крутые, движения в очаге – взброс, сдвиговая компонента незначительна. Подобное решение характерно для землетрясений, обязанным своим происхождением тектоническим процессам Южных Карпат. Решение его очень близко совпадает с решением механизма очага 16 августа 1986 г., которое считается форшоком сильнейшего события 30 августа 1986 г.

В решениях по тензору момента по силы сжатия близгоризонтальны: по HRVD и чуть ближе к вертикали – по ZUR. Меньший разброс отмечен в наклоне сил растяжения, они близвертикальны по всем решениям. Тип движения – почти чистый взброс.

В обоих типах решений вторые плоскости близки по азимутальному направлению. Рабочая плоскость по MOLD ориентирована в направлении запад-восток. Затем она, вероятно, изменила позицию в диагональном направлении.

Вышеперечисленные землетрясения произошли в горах Вранча, и глубины их очагов составили 87–170 км. Землетрясение 3 октября произошло на глубине порядка 10 км в дельте Дуная (Георгиевское устье). Есть определения механизма очага события 3 октября как по тензору момента центроида (HRVD, ZUR, MED), так и по стандартной методике (MOLD) (Рис. 18). Все решения близки между собой,

простираение обеих плоскостей: юго-восток – северо-запад. Оси напряжений сжатия ориентированы близвертикально, оси растяжения – близгоризонтально. В очаге наблюдается движение сбросо-сдвигового типа.

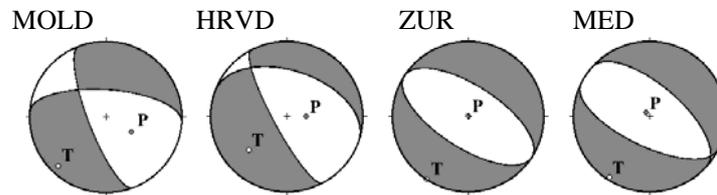


Рис. 18. Землетрясение 3 октября 2004 г.

Землетрясение 27 октября 2004 г. хотя и уступает по своим энергетическим характеристикам сильнейшим землетрясениям области Вранча, но значительно превосходит по магнитуде уровень сейсмического фона. Очаг землетрясения приурочен к северо-восточной части очаговой зоны Вранча и верхнему этажу глубин.

Механизм очага по первым вступлениям определён на основе 210 знаков вступлений *P*-волн (104 – сжатие, 106 – разрежение). 17 знаков не согласуются с принятым решением. Знаки хорошо разделяются на стереографической проекции. Обе возможные нодальные плоскости имеют северо-западное – юго-восточное простираение и наклонены к горизонту под углом в 46 *градусов*. Ось сжатия горизонтальна. Характер подвижки по обеим плоскостям надвиговой с небольшой сдвиговой компонентой.

Решения по методу тензора момента центроида HRVD, ZUR и NEIC (Рис. 19) близки между собой и характеризуются одной крутой, ориентированной на северо-восток – юго-запад. Другая плоскость пологая, в случае которой наблюдается различие в простираении для разных авторов. Ориентация осей напряжений во всех случаях почти одинакова. Поскольку при различных вариантах расчёта крутая плоскость оказалась более устойчивой, её можно принять за возможную плоскость разрыва. По всем решениям угол с горизонтом оси сжатия немного превышает таковой оси растяжения. Очаг представлен взбросо-сдвиговой подвижкой вдоль крутой плоскости.

По решению MED очаг представлен сбросовой подвижкой вдоль крутой плоскости. При рассмотрении разницы во времени и координат эпицентра землетрясения оказалось, что время в очаге по MED взято на 3 *секунды* раньше определений ISC, поэтому и решение механизма явилось исключением в ряду предыдущих определений.

Смещение эпицентра, определённого по методу ТМЦ (HRVD), наблюдается к юго-востоку на расстояние порядка 10 *км*, глубина очага уменьшается от 98 до 94 *км*.

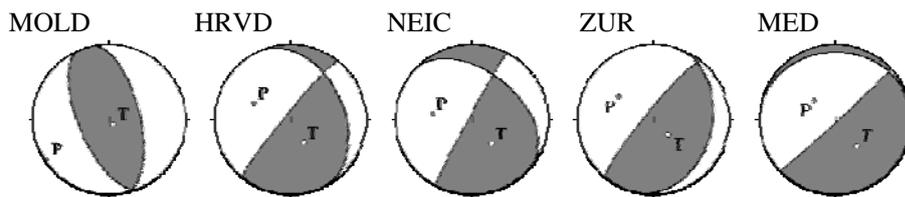


Рис. 19. Землетрясение 27 октября 2004 г.

В решениях MOLD, HRVD и NEIC азимуты второй плоскости $NP2$ близки между собой. Положение нодальной плоскости $NP1$ изменилось, вероятно, в процессе разрывообразования.

Решение механизма очага 14 мая 2005 г. построено по 102 знакам первых вступлений P -волн. Имеются также решения HRVD, ZUR, MED (Рис. 20). Согласно решению механизма очага MOLD оси напряжений имеют близширотную ориентацию. Обе возможные плоскости разрыва имеют близмеридиональное простирание. В очаге наблюдаются надвиговые подвижки с незначительной сдвиговой компонентой. Для выбора действующей плоскости разрыва мы руководствовались геологическими соображениями. По плоскости $NP1$ западный борт разрыва надвинут на восточный, в соответствии с продолжающимся вздыманием Карпатских гор. Сопоставление с альтернативными решениями показывает хорошее согласие.

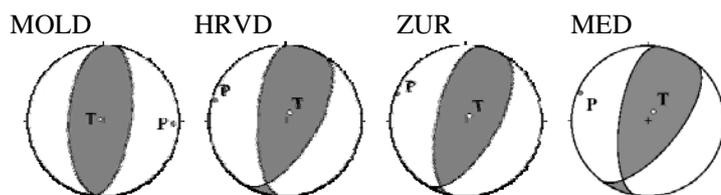


Рис. 20. Землетрясение 14 мая 2005 г.

Землетрясение 18 июня 2005 г. произошло в северо-восточной зоне Вранча. Согласно решению механизма очага, оси напряжений ориентированы на северо-северо-восток – юго-юго-запад.

Нодальные плоскости имеют близширотную направленность. Подвижки по обеим плоскостям представлены надвигами. Варианты решений MOLD, HRVD, ZUR и MED близки между собой (Рис. 21).

Очаг землетрясения 13 декабря 2005 г., как и при землетрясении 18 июня, локализован в северо-восточной части очаговой зоны Вранча на глубине ~ 140 км.

Решение механизма очага 13 декабря MOLD выполнено по 60 знакам первых вступлений P -волн. Распределение знаков в стереографической проекции очень неравномерное, их разделение затруднено. Обе нодальные плоскости простираются близширотно. Подвижки по ним представлены надвигами.

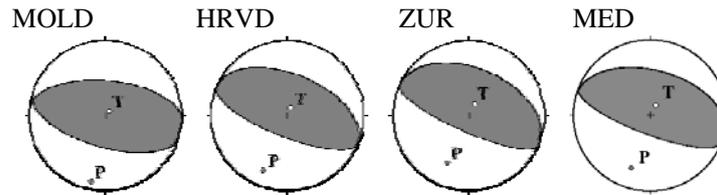


Рис. 21. Землетрясение 18 июня 2005 г.

Имеются решения HRVD, MED, тип движения по плоскости $NP1$ – почти чистый взброс (Рис. 22). Сравнение их с решением по знакам первых вступлений показывает согласие в ориентации осей напряжений. Совпадает тип движения в очаге по крутым плоскостям, ориентированным на северо-восток – юго-запад (надвиг). Различие наблюдается в положении вторых нодальных плоскостей, они пологие и простираются субмеридионально.

В решении HRVD и MED указано время в очаге почти на 3 секунды меньше, чем по данным других агентств.

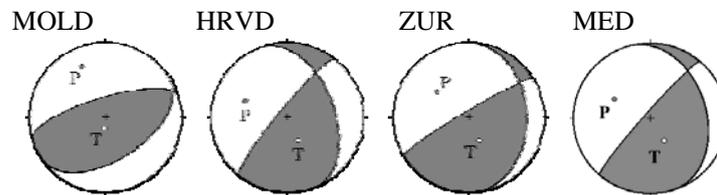


Рис. 22. Землетрясение 13 декабря 2005 г.

Достаточно сильное ($M_w = 5,2$) землетрясение произошло 25 апреля 2009 г. на глубине порядка 100 км в центральной части Вранча. Построение выполнено по 135 знакам, 12 не согласующихся с решением знаков. Обе возможные плоскости разрыва имеют диагональное простираение и почти равные углы падения. Подвижки по плоскостям представляют надвиги с небольшой сдвиговой компонентой.

Кроме того, имеются решения механизма очага землетрясения 25 апреля, полученные с помощью тензора момента центра по данным HRVD, ZUR, GCMT, NEIC, MED (Рис. 23). Все решения хорошо согласуются между собой. Северо-западный борт разрыва надвигается на юго-восточный.

Гипоцентр землетрясения 8 июня 2010 г. находился на глубине порядка 110 км. Механизм очага этого землетрясения построен по данным о 88 знаках вступлений P -волны. Ориентация возможных плоскостей разрыва: северо-запад – юго-восток. Имеются решения механизма очага по методу тензора момента центра HRVD и MED (Рис. 24). В решении HRVD наблюдается диагональная ориентация нодальных плоскостей.

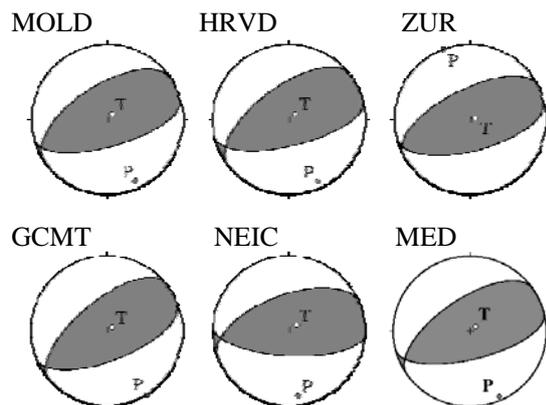


Рис. 23. Землетрясение 25 апреля 2009 г.

Тип решения согласуется в полученных вариантах. Подвижка в очаге близка к взбросу: юго-западный борт разрыва надвигается на северо-восточный. Решение MED отличается от предыдущих по ориентации нодальных плоскостей и направлению оси сжатия. Отличаются и координаты эпицентра землетрясения от определений основных агентств.

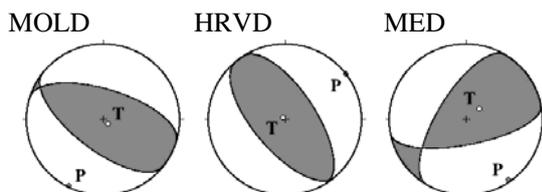


Рис. 24. Землетрясение 8 июня 2010 г.

Очаг землетрясения 30 сентября 2010 г. расположен на глубине порядка 140 км и приурочен к юго-западной окраине фокальной зоны Вранча. Для построения механизма очага было использовано 59 знаков. Обе нодальные плоскости ориентированы в направлении восток-запад. Разрыв в очаге произошёл под действием горизонтальной силы сжатия, направление оси которой меридиональное. По одной из плоскостей произошло надвигание северного борта разрыва на южный борт. По решению MED нодальные плоскости ориентированы диагонально (Рис. 25).

В 2011 году в Молдове произошло два ощутимых землетрясения 1 мая и 4 октября. При сравнительном анализе этих двух событий оказалось, что при небольшой разнице в размере магнитуд, в координатах эпицентра и глубинах очагов решения механизмов отличаются между собой. Макросейсмический эффект на территории Молдовы был сильнее 1 мая.

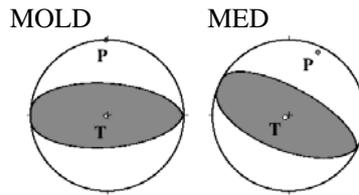


Рис. 25. Землетрясение 30 сентября 2010 г.

Для события 1 мая использовано 88 знаков. Ось напряжения сжатия P ориентирована субширотно. Обе нодальные плоскости простираются субмеридионально. Одна из них (рабочая) крутая падает на юго-запад, другая положе, имеет юго-восточное падение. Подвижка по крутой плоскости – взброс с небольшим левосторонним сдвигом.

По второму способу имеются решения MED и GFZ, которые согласуются с первым (Рис. 26).

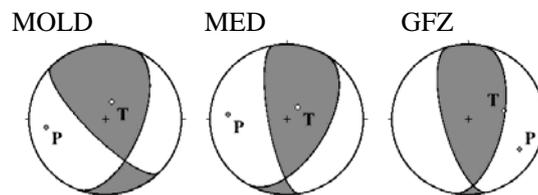


Рис. 26. Землетрясение 1 мая 2011

Для решения механизма очага 4 октября 2011 г. использовано 89 знаков. Как и в случае землетрясения 24 мая 2001 г. отмечено большое число знаков разряжения (32 с – 57 d). Ось напряжений растяжения T ориентирована на юг, сжатия P – почти на запад. Обе нодальные плоскости ориентированы близмеридионально и характеризуются надвиговыми подвижками. Одна из нодальных плоскостей рабочая, имеет падение на северо-запад, другая на северо-восток.

По методу ТМЦ есть решение MED, согласующееся с MOLD (Рис. 27).

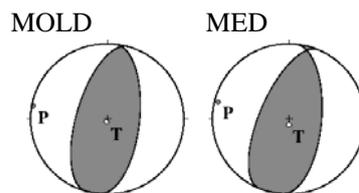


Рис. 27. Землетрясение 4 октября 2011 г.

Землетрясение 6 июля 2012 относится к северо-восточной части фокальной области и верхнему этажу глубин. Решение по первому типу построено по 63 хорошо разделяющимся знакам. Простираание обеих нодальных плоскостей – диагональное. Одна из нодальных плоскостей, рабочая, имеет крутое падение на северо-запад, другая пологая – на северо-восток. Решения по второму типу приводятся агентствами MED и NEIC. Решение MED согласуется с решением MOLD. Решение NEIC получилось иного типа. Нодальные плоскости расположены в направлении северо-запад – юго-восток (Рис. 28).

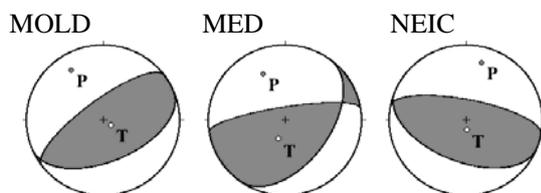


Рис. 28. Землетрясение 6 июля 2012 г.

Землетрясение 1 декабря 2012 г. произошло на северо-восточной границе зоны Вранча и глубине порядка 90 км. Знаки (98/22) плохо разделяются. Тип подвижки по обеим плоскостям надвиговый с небольшой сдвиговой компонентой. Решение MED в целом не противоречит первому решению (Рис. 29). Северо-западный борт разрыва надвигается на юго-восточный.

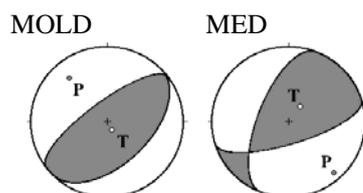


Рис. 29. Землетрясение 1 декабря 2012 г.

Очаг землетрясения 6 октября 2013 г. приурочен к центральной части области Вранча и глубине порядка 130 км. Получено решение MOLD механизма землетрясения по 109 знакам. Механизм MOS определен по 69 знакам. Имеются также решения механизма по методу ТМЦ: USGS, GCMT, MED, GFZ (Рис. 30).

Землетрясение произошло под действием сил близгоризонтального сжатия и близвертикального растяжения. Горизонтальные составляющие сжимающих напряжений нормальны к Карпатской дуге в районе её изгиба. Линия пересечения плоскости, в которой располагаются оси P и T с земной поверхностью, служит касательной к горной дуге. Тип подвижки по обеим плоскостям надвиговый с небольшой сдвиговой компонентой. Такой характер механизма является типичным для промежуточных вранчских очагов.

Решения механизма очага, полученные двумя методами, хорошо согласуются между собой.

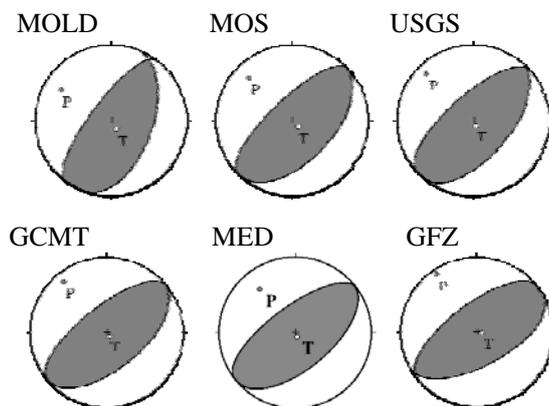


Рис. 30. Землетрясение 6 октября 2013 г.

Характер механизма землетрясения 15 октября 2013 г. по MOLD и MED близок к таковому для события 6 октября 2013 г. (Рис. 31).

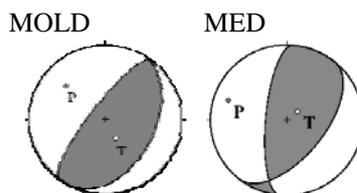


Рис. 31. Землетрясение 15 октября 2013 г.

Землетрясение 29 марта 2014 г. произошло в центральной части Вранча на глубине порядка 130 км. Решение механизма очага построено по 87 знакам вступлений волн *P*. Знаки хорошо разделяются на стереографической проекции. Обе нодальные плоскости ориентированы в близмеридиональном направлении. Ось сжатия близгоризонтальна и направлена на запад. Ось растяжения близвертикальна.

В очаге произошла надвиговая подвижка. В решениях GCMT, MED, GFZ сохранилась схожая ориентация нодальных плоскостей и тип подвижки по сравнению с первым решением (Рис. 32).

В каталоге ВУС имеется решение механизма очага 10 сентября 2014 г. по 68 знакам вступлений волн *P* на сейсмических станциях мира. Знаки хорошо разделяются на стереографической проекции. Одна из нодальных плоскостей крутая и ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток. Другая альтернативная плоскость пологая и ориентирована в направлении запад-восток. Ось сжатия близгоризонтальна и направлена на северо-восток. Ось растяжения

близвертикальна. При изучении механизма очага выявлено, что станции Кишинёв и Малые Милешты лежат вблизи нодальной плоскости $NP2$ (поверхности, на которой смещения в продольных волнах или определённые компоненты в поперечных равны нулю). По этой плоскости произошла надвиговая подвижка. На сейсмограммах отмечена малая величина амплитуд в волне P .

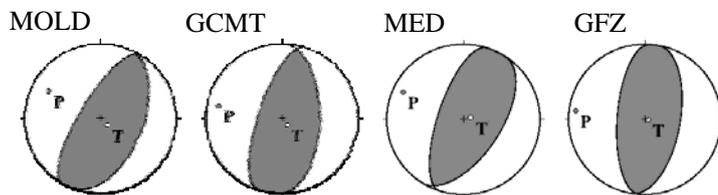


Рис. 32. Землетрясение 29 марта 2014 года

Решения MED и GFZ совпадают с предыдущим (Рис. 33).

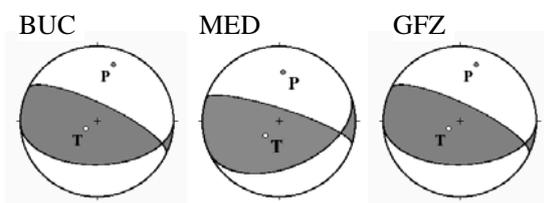


Рис. 33. Землетрясение 10 сентября 2014 г.

Наиболее значительным коровым событием за инструментальный период наблюдений было землетрясение 22 ноября 2014 г. с магнитудой $m_l = 5.7$ и глубиной очага 40 км. Землетрясения в данной зоне продолжались вплоть до 19 января 2015 г. Наибольшим был афтершок 7 декабря с $m_l = 4.5$. Очаги связаны с активизацией разлома Печеняга-Камена.

В каталоге BUC и информационном сообщении ИОЦ ГС РАН имеется решение механизма очага землетрясения 22 ноября по первому способу. Одна из плоскостей крутая, вторая возможная плоскость пологая. Движение в очаге возникло под действием растягивающих напряжений.

Приведены также механизмы очага по данным, NEIC, IPGP, INGV, GCMT, MED (Рис. 34).

Решения по данным разных центров подобны. Во всех случаях одна из нодальных плоскостей наклонена к горизонту близвертикально. Тип движения – левосторонний сдвиг с компонентами сброса. Другая альтернативная плоскость залегает как полого, так и под большим углом. Простираение крутой плоскости согласуется с направлением разрыва Печеняга–Камена.

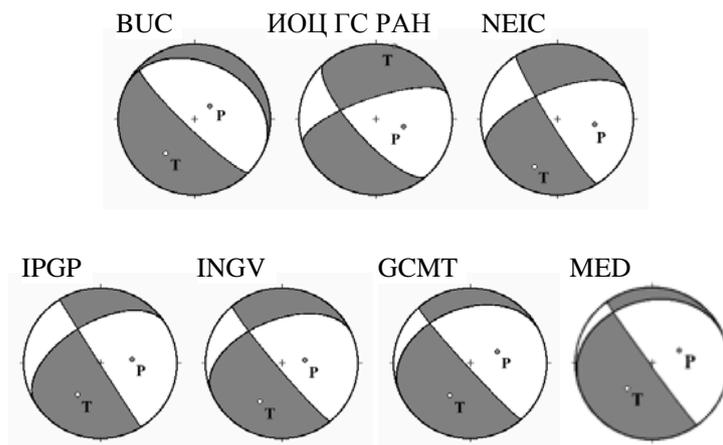


Рис. 34. Землетрясение 22 ноября 2014 г.

Для корового события 7 декабря 2014 г. получено решение BUC по 50 знакам. Решение MED согласуется с предыдущим (Рис. 35). Ось растяжения близгоризонтальна, ось сжатия наклонна.

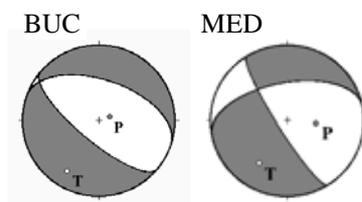


Рис. 35. Землетрясение 7 декабря 2014 г.

ВЫВОДЫ

Нами собраны и проанализированы решения 34 механизмов очагов карпатских землетрясений по знакам вступлений продольных волн и решения по методу тензора момента центроида. Имея в виду, что решения первого типа получены по короткопериодной аппаратуре, а тензор момента по длиннопериодной сейсмограмме, решения по первому вступлению *P*-волн можно отнести к самому началу процесса в очагах, а полученное по тензору момента к этапу наступления его максимальной фазы. Таким образом, получается, что различия в механизмах очагов, полученных разными способами, свидетельствуют о сложном характере процессов вспарывания в очагах изучаемых землетрясений и вероятно об изменении ориентации плоскости разрывов во времени.

Анализ механизмов очагов за период 1977–2014 гг. показал, что в небольшом сейсмогенном объёме наблюдается хаотичная ориентация плоскостей разрыва в

соответствии с приуроченностью эпицентров к различным частям Карпатской горной дуги. Очаги землетрясений относятся к разным этажам глубин.

Большинство из рассмотренных землетрясений области Вранча произошли под действием сжимающих напряжений; одно событие 30 11 2002 г. с глубиной очага 170 км – под действием растягивающих напряжений. Три коровых землетрясения имели сдвиго-сбросовый характер. Если в центре сетки Вульфа для промежуточных очагов находится область сжатия и ось растяжения, то для коровых – в центре область растяжения с осью сжатия.

Сравнение решений, полученных по знакам P -волн, с решениями ТМЦ для землетрясений 04 03 1977 г., 02 10 1978 г., 30 08 1986 г., 30 05 и 31 05 1990 г., 28 04 1999 г., 24 05 2001 г., 30 11 2002 г., 03 10 2004 г., 14 05 и 18 06 2005 г., 25 04 2009 г., 01 05 и 04 10 2011 г., 06 10 2013 г., 29 03 и 10 09 2014 г. показывает практическую их тождественность.

Для достаточно сильного землетрясения 27 10 2004 г. с $M_w = 5.8$ положение нодальной плоскости изменилось, вероятно, в процессе разрывообразования.

Для некоторых землетрясений при том же типе подвижки отдельные различия отмечаются лишь в ориентации нодальных плоскостей и осей главных напряжений. Возможно, это связано с использованием различных методик определений механизма очага.

Тип подвижки в очагах вранчских землетрясений (надвиг, взбросо-сдвиг) в основном сохраняется, независимо от существенной разницы в положении нодальных плоскостей, полученные разными способами. Это связано с обстоятельством, что различия в положении нодальных плоскостей закономерны. Было замечено, что в случаях сравнения положение одной из нодальных плоскостей остаётся почти одинаковой; другая нодальная плоскость в случае первого решения и по ТМЦ имеет почти то же самое падение, но простирание отличается на величину от 30° до 90° . В некоторых случаях механизм остаётся такой же самый, но обе плоскости повернуты на угол от 30° до 60° , сохраняя взаимное расположение. В некоторых случаях различия в положении нодальных плоскостей не имеют закономерного характера.

Сделан вывод о возможной связи выявленных различий, как с природой самих событий, так и с несоответствием используемой модели очагов реальным процессам.

Проведённый нами анализ показывает, что сравнение механизмов, полученных по короткопериодным волнам и по тензору момента, может дать ценную информацию о развитии процесса вспарывания во времени землетрясений.

Для более полной характеристики напряжённо-деформированного состояния среды в Карпатском регионе следует применять оба метода, дополняющие друг друга.

Список литературы

1. Балакина Л. А., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 198 с.
2. Вербицкий С. Т., Пронишин Р. С., Прокопишин В. И., Стецкив А. Т., Чуба М. В., Ницименко И. М., Келеман И. Н. Сейсмичность Карпат в 2014 году // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Том 27 (66). № 4. С. 87–96.
3. Единая геофизическая служба Российской академии наук [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/ksa/info_earthquake.pl?mode=-1.

4. Bulletin of the International Seismological Centre for 1977–2014. International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.isc.ac.uk/>.
5. Institutul National pentru Fizica Pamantului С. Р. MG-2. Bucuresti–Magurele. Romania. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www1.infp.ro/arhiva-in-timp-real/>.
6. Друмя А. В., Степаненко Н. Я., Илиеш И. И. и др. Сейсмический режим области Вранча за период 1991–2001 гг. // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 73–77.
7. Друмя А. В., Степаненко Н. Я., Симонова Н. А., Алексеев И. В., Карданец В. Ю. Атлас карт интенсивности землетрясений Молдовы (XVIII–XXI вв.). Кишинёв: Descrierea CIP a Camerei Nationale a Cartii, 2009. 154 с.
8. Степаненко Н. Я., Симонова Н. А., Карданец В. Ю. Сравнительный анализ механизмов очагов землетрясений области Вранча, полученных двумя методами // Buletinul Institutului de Geologie si Seismologie al Academiei de Stiinte a Moldovei. 2012. № 1. С. 17–32.
9. Степаненко Н. Я., Симонова Н. А., Карданец В. Ю. Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год. Севастополь: НИЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. С. 46–56.
10. Dziejowski A. M., Chou T. A., Woodhouse J. H. Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity // Journal Geophysical Research. 1981, no. 86, pp. 2825–2852.
11. EMSC, Earthquake information Euro-Med seismicity. Real Time Seismicity [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php>.
12. Mostryukov A. O., Petrov V. A. Catalogue of focal mechanisms of earthquakes 1964–1990. Materials of the World Data Center. Moscow, 1994. 87 p.
13. Radulian M., Popescu E., Bala A., Utale A. Catalog of fault plane solution for the earthquakes occurred on the Romanian territory // Romanian Journal Physics. 2002, no. 47, pp. 663–683.
14. Oncescu M. C., Apolozan L. Dubletul seismic de la 1 august 1985. Revue roumaine de géographie Geologie and Geophysique. 1986, v. 24, pp. 12–16.
15. Trifu C. I., Oncescu M. C. Fault geometry of August 30 1986 Vrancea earthquake // Annales de Geophysique. 1987, v 5, no. 6, pp. 727–729.
16. Захарова А. И., Чепкунас Л. С., Коломиец М. В. и др. Сильные землетрясения мира. Землетрясения в СССР в 1990 году. М.: РАН, 1996. С. 214.
17. Bonjer K. P., Oncescu L., Rizescu. T. e. a. Source- and Site-Parameters of the April 28, 1999 // International Conference Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Bucharest: Académie Roumaine. 2002, pp. 24–26.
18. Информационное сообщение об ошутимом землетрясении в Румынии 22 ноября 2014 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/ceme/quake_stat.pl?sta=20144272&l=0.
19. Muller G., Bonjer K. P., Stockl H. Procesul de rupere dedus din solutia planului de falie si analiza evenimentului multiplu // Cercetari seismologice asupra cutremurului din 4 martie 1977. Bucurest: Académie Roumaine. 1979, pp. 17–38.
20. Enescu D. Contributions to the knowledge of the focal mechanism of the Vrancea strong earthquake of March 4, 1977 // Revue Roumaine Geologie, Geophysique, Geographie. 1980, v. 24. no. 1, pp. 3–18.

**COMPARISON OF REGIONAL DEFINITIONS
FOR FOCAL MECHANISMS OF CARPATHIAN EARTHQUAKES
WITH CENTROID MOMENT TENSOR SOLUTIONS**

Stepanenco N. Ya., Cardanet V. Yu.

*Institute of Geology and Seismology of the Moldavin AS, Chisinau, Moldova
E-mail: seismolab@rambler.ru*

The article presents focal mechanisms solutions of 34 earthquakes with $M_w \geq 4.4$, occurred in 1977–2014 and manifested in Republic of Moldova. Seismic hazard in the Republic of Moldova is largely determined by the influence of the intermediate region of Vrancea earthquakes and crustal earthquakes occurring in the south-eastern part of Romania. Consider the features of the mechanisms of earthquakes eastern part of the Carpathian area, the decisions of which were obtained in two ways in the period 1977–2014.

The objective of this work consisted of a comparison of the results of the field reconstruction of tectonic stresses in the Carpathian region with the use of two different methods described, applied to the same strong earthquakes.

The comparative analysis of focal mechanisms of these earthquakes, made by the method of the P -waves first arrival and the method of centroid moment tensor (CMT), was done. For the strongest earthquakes – March 4, 1977, August 30, 1986 and May 30, 1990 – with the help of a comparative analysis of the mechanisms, the scheme of faulting process was created, since standard definition refers to the beginning of the process in the focus, and CMT solution refers to the moment of maximum energy release. The picture of the stress-strain state of the Earth's crust and upper mantle in the parameters of the centroid moment tensor as a whole does not differ from the picture obtained from the focal mechanisms data by the standard method. However, for individual events differences in the parameters that characterize stresses and the rupture plane and differences in the types of dislocations are marked. It was concluded that differences may relate as to the nature of the events themselves, and with mismatch of used focus model with real processes. The focal mechanism of the intermediate earthquakes of Vrancea region is caused by the action of sub-horizontal compression and sub-vertical stretching. For some earthquakes with the same type of progress the individual differences observed only in the orientation of the nodal planes and axes of the principal stresses. Perhaps this is due to the use of different techniques of focal mechanism determinations. The occurrence of strong crustal earthquakes in the region is caused by the influence of sub-horizontal stretching. Our analysis shows that the comparison of mechanisms, obtained by short-period waves and moment tensor, can provide valuable information about the progress of the ripping process in time for major earthquakes. For a more complete characterization of the stress-strain state of the environment it is recommended to use both methods, complementing each other.

Keywords: earthquake, Vrancea zone, focal mechanism, radiation direction, stress, nodal plane.

References

1. Balakina L. A., Vvedenskaya A. V., Golubeva N. V., Misharina L. A., Shirokova E. I. Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij (Field of elastic stresses of the Earth and the earthquake focal mechanism). Moscow: Nauka, 1972, 198 p. (in Russian).
2. Verbickij S. T., Pronishin R. S., Prokopishin V. I., Steckiv A. T., CHuba M. V., Nishchimenko I. M., Keleman I. N. Sejsmichnost' Karpat v 2014 godu (Seismicity of Carpathians in 2014). Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Seriya «Geografiya». 2014, v. 27(66), no. 4, pp. 87–96 (in Russian).

3. Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossijskoj akademii nauk [Elektronic resource]. URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/ksa/info_quake.pl?mode=-1 (in Russian).
4. Bulletin of the International Seismological Centre for 1977–2014. International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Elektronic resource]. URL: <http://www.isc.ac.uk/>. Thatcham, United Kingdom.
5. Institutul National pentru Fizica Pamantului C. P. MG-2. Bucuresti–Magurele. Romania. [Elektronic resource]. URL: <http://www1.infp.ro/arhiva-in-timp-real/>.
6. Drumya A. V., Stepanenko N. YA., Iliesh I. I. i dr. Sejsmicheskij rezhim oblasti Vrancea za period 1991–2001 gg. (Seismic regime of Vrancea region in Carpathians during 1991–2001). Sejsmichnost' Severnoj Evrazii Materialy Mezhdunarodnoj konferencii. Obninsk: GS RAN, 2008, pp. 73–77 (in Russian).
7. Drumya A. V., Stepanenko N. Ya., Simonova N. A., Alekseev I. V., Kardanec V. Yu. Atlas kart intensivnosti zemletryasenij Moldovy (XVIII–XXI vv.) (Atlas of the intensity maps of the earthquakes in Moldova (18–21-th centuries). Kishinyov: Descrierea CIP a Camerei Nationale a Cartii, 2009. 154 p. (in Russian).
8. Stepanenko N. Ya., Simonova N. A., Kardanec V. Yu. Sravnitel'nyj analiz mekhanizmov ochagov zemletryasenij oblasti Vrancea, poluchennyh dvumya metodami (Comparative analysis of fault plane solutions of the earthquakes of Vrancea region, executed using two methods). Buletinul Institutului de Geologie si Seismologie al Academiei de Stiinte a Moldovei. 2012, no. 1, pp. 17–32 (in Russian).
9. Stepanenko N. Ya., Simonova N. A., Kardanec V. Yu. Prostranstvennye variacii oseb glavnyh napryazhenij v ochagah zemletryasenij oblasti Vrancea (The spatial peculiarities of focal parameters of Vrancea region earthquakes.) Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2012 god. Sevastopol: NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2013, pp. 46–56 (in Russian).
10. Dziewonski A. M., Chou T. A., Woodhouse J. H. Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity. Journal Geophysical Research, 1981, no. 86, pp. 2825–2852 (in English).
11. EMSC, Earthquake information Euro-Med seismicity. Real Time Seismicity [Elektronic resource]. URL: <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php>. (in English).
12. Mostryukov A. O., Petrov V. A. Catalogue of focal mechanisms of earthquakes 1964–1990. Materials of the World Data Center. Moscow, 1994. 87 p. (in English).
13. Radulian M., Popescu E., Bala A., Utale A. Catalog of fault plane solution for the earthquakes occurred on the Romanian territory. Romanian Journal Physics. 2002, no. 47, pp. 663–683 (in English).
14. Oncescu M. C., Apolozan L. Dubletul seismic de la 1 august 1985. Revue roumaine de Géographie Geologie and Geophysique. 1986, v. 24, pp. 12–16 (Romanian).
15. Trifu C. I., Oncescu M. C. Fault geometry of August 30 1986 Vrancea earthquake. Annales de Geophysique. 1987, v. 5, no. 6, pp. 727–729 (in English).
16. Zaharova A. I., Chepkunas L. S., Kolomic M. V. i dr. Sil'nye zemletryaseniya mira (Strong earthquakes of the World). Zemletryaseniya v SSSR v 1990 godu. Moscow: RAN, 1996, pp. 214 (in Russian).
17. Bonjer K. P., Oncescu L., Rizescu. T. e. a. Source- and Site-Parameters of the April 28, 1999. International Conference Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Bucharest: Académie Roumaine, 2002, pp. 24–26 (in English).
18. Informacionnoe soobshchenie ob oshchutimom zemletryasении v Rumynii 22 noyabrya 2014 g. [Elektronic resource]. URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/ceme/quake_stat.pl?sta=20144272&l=0 (in Russian).
19. Muller G., Bonjer K. P., Stockl H. Procesul de rupere dedus din solutia planului de falie si analiza evenimentului multiplu. Cercetari seismologice asupra cutremurului din 4 martie 1977. Bucuresti: Académie Roumaine, 1979, pp. 17–38 (Romanian).
20. Enescu D. Contributions to the knowledge of the focal mechanism of the Vrancea strong earthquake of March 4, 1977. Revue Roumaine. Geologie, Geophysique, Geographie. 1980, v. 24, no. 1, pp. 3–18 (in English).

Поступила в редакцию 25.11.2016 г.