

УДК 550.341

СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕГИОНЕ ВРАНЧА: АНАЛИЗ НОВЫХ ДАННЫХ

И.А. Воробьева¹, О.В. Новикова¹, Д. Энеску²,
М. Радулиан², И.В. Кузнецов¹, Д. Панца³

¹ *Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук*

² *Национальный институт физики Земли, Румыния*

³ *Институт геодезии и геофизики, Университет Триеста
и Международный центр теоретической физики, Италия*

Работа посвящена среднесрочному прогнозу сильных землетрясений региона Вранча (Румыния) по данным о сейсмичности промежуточной глубины, полученным румынской локальной сетью. Регион Вранча не является типичным для применения алгоритма среднесрочного прогноза КН – обычно этот алгоритм используется для предсказания поверхностных землетрясений на территории с линейными размерами в сотни километров. Во Вранче основная сейсмичность сосредоточена на очень небольшой территории и на промежуточной глубине. В работе показано, что алгоритм КН может применяться для прогноза сильных землетрясений промежуточной глубины и с использованием сейсмичности только этой глубины. Для периода 1932–1993 гг. 4 из 5 сильных землетрясений с магнитудой выше 6.4 предваряются тревогами; продолжительность тревог составляет 21.7% всего периода. Результаты ретроспективного прогноза дают потенциальную возможность продолжения мониторинга подготовки сильных землетрясений во Вранче по данным румынской локальной сети в случае регулярного пополнения каталога.

INTERMEDIATE-TERM PREDICTION OF LARGE EARTHQUAKES IN VRANCEA REGION: AN ANALYSIS OF NEW DATA

I.A. Vorobieva¹, O.V. Novikova¹, D. Enescu², M. Radulian²,
I.V. Kuznetsov¹, and G. Panza³

¹ *International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences*

² *National Institute for Earth Physics, Romania*

³ *Institute of Geodesy and Geophysics, University of Trieste
and International Center for Theoretical Physics, Italy*

This paper deals with intermediate-term earthquake prediction in Vrancea, using data on the intermediate-depth seismicity from the Romanian local seismograph network. Vrancea is not a typical region for an application of the CN algorithm. Usually CN is used to predict

shallow earthquakes in a region with linear dimension of a few hundred kilometers. In Vrancea most of the seismicity is concentrated within a very narrow prone zone and at intermediate depths. In this paper the applicability of the CN-algorithm was justified to predict intermediate depth earthquakes using intermediate depth seismicity only. For the period of time from 1932 till 1993 four out of five earthquakes of magnitude 6.4 and above were preceded by alarms: alarm time occupies 21.7% of the total time period. The results of a retrospective test indicate the possibility of monitoring the preparation of large Vrancea earthquakes in case of the regular and quality updating of data of Romanian local seismic network.

ВВЕДЕНИЕ

Эта работа посвящена среднесрочному прогнозу землетрясений в сейсмоактивном регионе Вранча (Румыния).

Регион Вранча характеризуется относительно высоким уровнем сейсмичности: в нашем столетии здесь произошло четыре катастрофических землетрясения с магнитудой 7 и более. Они вызвали значительные разрушения не только в Румынии, но и в других европейских странах. Так как на этой территории в настоящее время работает несколько атомных электростанций, проблема прогноза становится особенно важной.

Известно несколько работ по прогнозу сильных землетрясений во Вранче. Прогноз сильных землетрясений с промежуточной глубиной очага, основанный на периодичности их возникновения, был сделан Энеску [1]. Был предсказан пик сейсмической активности в период 1977–1990 гг., в течение которого предполагалось возникновение нескольких землетрясений интенсивностью $I_0 = \text{VII–VIII}$ баллов и одного с $I_0 = \text{VIII–IX}$. Этот долгосрочный прогноз был подтвержден сильными землетрясениями 4 марта 1977 г. ($I_0 = \text{VIII–IX}$), 30 августа 1986 г. ($I_0 = \text{VIII}$) и 30 мая 1990 г. ($I_0 = \text{VII–VIII}$). Эти же данные позволяют сделать следующий прогноз: предполагается возникновение землетрясения интенсивностью $I_0 = \text{VIII}$ или 2–3 землетрясений интенсивностью $I_0 = \text{VII–VIII}$ в период с 2000 по 2008 г. [1].

Другая попытка прогноза землетрясений во Вранче была сделана Энеску и Ианасом [2] с помощью винеровского фильтра. Они показали, что "интервал времени 1981–1990 гг. будет характеризоваться высоким уровнем сейсмической активности, максимальная ожидаемая магнитуда: 6.8–7.0". Этот долгосрочный прогноз был подтвержден землетрясениями 30 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г., которые действительно произошли в рассматриваемый период. Однако винеровский фильтр не отразил значительного повышения сейсмической активности в 1976–1980 гг., когда произошло сильное землетрясение 4 марта 1977 г.

Все предыдущие попытки предсказания сильных землетрясений во Вранче ограничивались долгосрочным прогнозом. В данной работе мы применяем алгоритм среднесрочного прогноза КН [3] для предсказания сильных землетрясений промежуточной глубины. Этот алгоритм, который ранее применялся для прогноза поверхностных землетрясений, основан на количественном анализе предвестников, предвещающих появление сильного землетрясения.

Первая попытка применения алгоритма КН в этом регионе была сделана Дмитриевой [4]: землетрясение 1977 г. было предсказано ретроспективно, для землетрясения 1986 г. был сделан прогноз вперед, землетрясение 1990 г. было пропущено, а также имеются две ложные тревоги. В работе [4] использован каталог

"Землетрясения в СССР" [5], который с 1991 г. не пополнялся, что не позволяет вести текущий прогноз сильных землетрясений региона Вранча.

Цель данной работы – проверить применимость алгоритма КН для прогноза сильных землетрясений с промежуточной глубиной очага по данным, полученным румынской локальной сетью. С этой целью для периода 1932–1993 гг. были объединены румынские локальные каталоги землетрясений [6] и [7] и каталог "Землетрясения в СССР" [5].

СЕЙСМОТЕКТОНИКА РЕГИОНА ВРАНЧА

Сейсмоактивный регион Вранча характеризуется сравнительно небольшими размерами и высоким уровнем сейсмичности на промежуточной глубине.

Существует несколько сейсмотектонических моделей региона Вранча. Фукс [8] предполагает наличие ориентированной с северо-востока на юго-запад древней зоны субдукции, юго-восточная оконечность которой в настоящее время отделена от остальной плиты.

Онеску [9], в отличие от Фукса, предполагает, что землетрясения промежуточной глубины во Вранче зарождаются не внутри субдуцирующей плиты, а в вертикальной зоне, отделяющей ее от неподвижной части плиты.

КонстантINESКУ и Энеску [10] предполагают наличие зоны субдукции, ориентированной с юго-востока на северо-запад. Эта модель объясняет эволюцию региона Восточных Карпат (особое внимание уделено региону Вранча) с начала закрытия древнего океана в результате столкновения Евразийской и Африканской плит и Аравийского полуострова. Модель объясняет физико-механические процессы, происходившие после начала стадии коллизии. Все эти процессы могут объяснить распределение гипоцентров, механизмы очагов коровых и промежуточных землетрясений региона Вранча и геометрические, кинематические и динамические параметры сейсмических источников.

СЕЙСМИЧНОСТЬ РЕГИОНА ВРАНЧА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Существует несколько каталогов землетрясений сейсмоактивного региона Вранча [5–7]. В настоящее время пополняется только каталог [7], что предоставляет потенциальную возможность мониторинга подготовки сильных землетрясений региона Вранча. Каталог [7], покрывающий период с 1980 по 1993 г., содержит землетрясения только промежуточной глубины ($h > 60$ км). В каталоге представлена локальная моментно-калиброванная магнитуда ML :

$$\log M_0 = 1.0ML + 12.7$$

для ML от 2.5 до 5.5 и M_0 в виде Nm .

Учитывая специфическую форму волнового источника промежуточных землетрясений региона Вранча, Трифу и Радулиан [7] использовали записи одной или двух станций локальной сети для идентификации событий, а калибровочная техника, предложенная Трифу [11], позволила определить глубину источника с погрешностью около 5 км. Таким образом, даже если невозможно полностью определить гипоцентры слабых землетрясений, можно значительно улучшить представительность каталога примерно до магнитуды 2.5 (рис. 1, кривая 1; табл. 1).

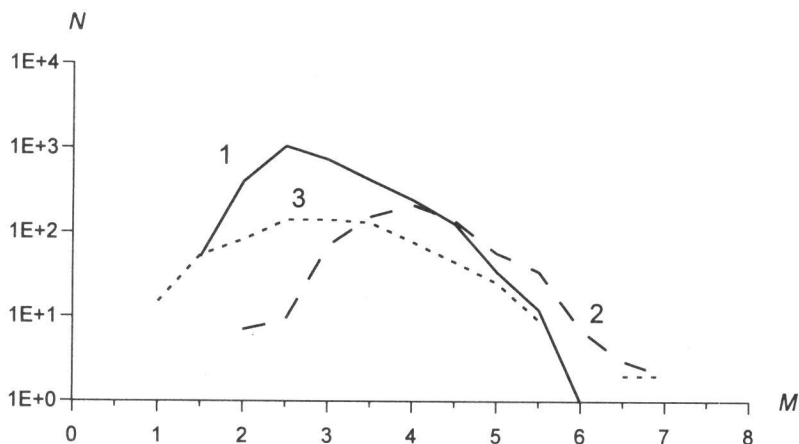


Рис. 1. Графики повторяемости для каталогов [7] (кривая 1), [6] (кривая 2) и [5] (кривая 3)

ТАБЛИЦА 1. Распределение землетрясений по магнитуде и времени в каталоге [7]

Год	Магнитуда											Всего за год
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
1980	10	35	41	25	11	7	2	.	.	.	.	131
1981	24	63	38	24	17	6	1	1	.	.	.	174
1982	13	82	35	19	20	10	2	.	.	.	.	181
1983	22	63	45	21	13	9	4	1	.	.	.	178
1984	27	76	57	22	13	7	3	.	.	.	.	205
1985	27	76	51	30	16	6	4	1	.	.	.	211
1986	36	184	93	50	32	13	4	.	.	.	1	413
1987	29	83	46	25	11	12	2	1	.	.	.	209
1988	33	78	59	20	12	8	1	.	.	.	.	211
1989	33	88	54	22	11	7	4	.	.	.	.	219
1990	125	140	110	63	27	12	1	1	1	.	1	481
1991	9	43	47	33	27	15	1	2	.	.	.	177
1992	9	28	29	30	14	5	2	5	.	.	.	122
1993	.	1	20	29	20	9	3	.	.	.	.	82
За весь период	397	1040	725	413	244	126	34	12	1	0	2	2994

С 1991 г. представительность каталога несколько ухудшается, в этот период в нем представлены события начиная с магнитуды 3.0. Фактически известно, что все события промежуточной глубины расположены в очень небольшой области (рис. 2). Такое ограничение в определении локализации событий (только глубина) в данном случае не критично для применения алгоритма КН. Распределение событий по глубине дано в табл. 2.

Каталог [7] достаточно репрезентативен по магнитуде для применения алгоритма КН, однако использование только этих данных нежелательно, так как они покры-

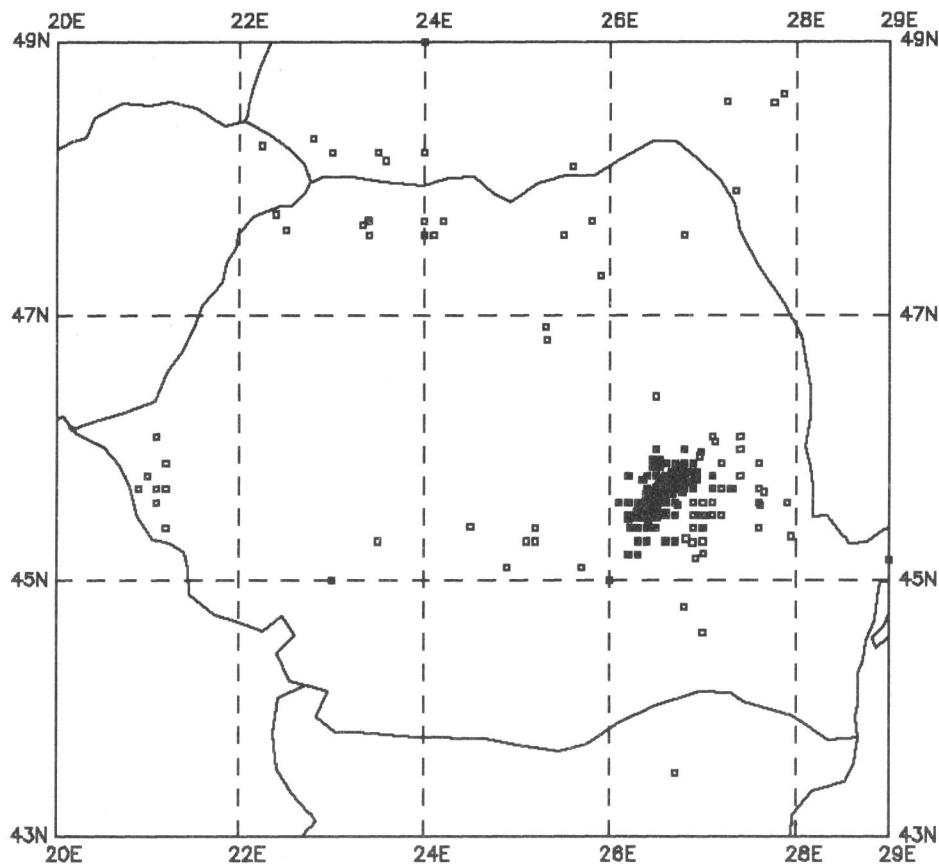


Рис. 2. Карта сейсмичности региона Вранча (по объединенному каталогу)

Интервал магнитуд 3.5–6.3: светлые квадраты – землетрясения с глубиной очага от 0 до 60 км, темные – землетрясения с глубиной очага от 60 до 200 км; интервал магнитуд 6.4–8.9: большие темные квадраты – землетрясения с глубиной очага от 60 до 200 км

вают небольшой интервал времени, который к тому же характеризуется повышенным уровнем сейсмической активности – в этот период произошли два сильнейших землетрясения в 1986 г. и 1990 г. (см. ниже табл. 7). Алгоритм КН настраивается автоматически на уровень сейсмической активности региона, поэтому аномальная активность в период обучения ведет к ее неадекватной оценке, что может в дальнейшем привести к ошибкам при прогнозе вперед. Необходимо расширить временной интервал, используя другие каталоги землетрясений. Рассмотрим с этой точки зрения имеющиеся данные.

Существует, по крайней мере, еще два каталога землетрясений сейсмоактивного региона Вранча.

Первый – это румынский каталог [6], который покрывает период времени с 1900 по 1979 г. и территорию 41.2° – 48.4° N, 20.8° – 29.8° E. Фактически все землетрясения промежуточной глубины сконцентрированы на территории 45° – 46° N, 26° – 27° E (рис. 2). В каталоге представлена локальная магнитуда и представительность его

меняется во времени – например, хорошо виден существенный недостаток событий в период 1914–1932 гг. (табл. 3). С 1932 г. каталог представлен для магнитуды 4 и выше (рис. 1, кривая 2). В каталоге представлены события с глубиной от 0 до 190 км. До 1932 г. наблюдается недостаток событий с промежуточной глубиной очага и одновременно – избыток поверхностных землетрясений, что может быть вызвано неправильным определением глубины для части событий (табл. 4). Поверхностные и промежуточные землетрясения хорошо разделены практически асейсмичной 50-километровой зоной с центром на глубине около 60 км (табл. 4).

ТАБЛИЦА 2. Распределение землетрясений по магнитуде и глубине в каталоге [7]

Глубина, км	Магнитуда												Всего на данной глубине
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
60	5	13	11	7	1	.	.	.	.	.	.	.	37
65	2	18	14	8	4	3	.	.	.	.	.	.	49
70	11	29	17	12	5	1	2	.	.	.	.	.	77
75	9	40	31	25	11	2	.	.	.	.	.	.	118
80	11	53	44	31	17	1	.	1	.	.	.	.	158
85	11	64	52	43	20	10	2	.	.	1	.	.	203
90	1	26	29	26	15	8	1	.	.	.	.	1	107
95	1	20	24	17	13	9	1	.	.	.	.	.	85
100	.	10	17	11	9	5	4	.	.	.	.	.	56
105	.	24	39	14	8	2	4	.	.	.	.	.	91
110	.	28	37	18	14	7	3	2	.	.	.	.	109
115	.	21	44	21	23	4	6	.	.	.	.	.	119
120	.	24	75	38	25	11	5	1	2	.	.	.	181
125	.	16	83	43	32	13	5	3	.	.	.	.	195
130	.	5	89	53	30	21	8	3	3	.	.	.	212
135	.	2	107	83	38	15	11	2	1	.	.	1	260
140	.	3	99	64	41	29	8	2	1	.	.	.	247
145	.	1	88	66	27	33	17	10	1	.	.	.	243
150	.	.	79	62	36	33	20	3	1	.	.	.	234
155	.	.	52	62	35	19	14	3	2	.	.	.	187
160	.	.	5	18	8	15	12	2	1	.	.	.	61
165	.	.	4	3	1	2	2	1	.	.	.	.	13
170	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1
175	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1
180	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
185	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
190	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
195	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
200	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
205	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
210	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1
На всех глубинах	51	397	1040	725	413	244	126	34	12	1	0	2	3045

ТАБЛИЦА 3. Распределение землетрясений по магнитуде и времени в каталоге [6]

Год	Магнитуда													Всего за 2 года
	0.0	2.0	2.5	3.0	3,5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0		
1900	10	.	.	.	.	2	5	2	.	1	.	.	20	
1902	7	.	.	.	.	3	1	.	3	.	.	.	14	
1904	14	.	.	.	.	.	2	.	1	.	.	.	17	
1906	12	1	.	.	.	1	3	.	.	.	.	.	17	
1908	5	.	.	.	.	1	1	.	.	1	.	.	8	
1910	16	.	.	1	.	3	.	.	.	.	.	.	20	
1912	17	.	.	.	.	2	2	3	2	1	.	.	27	
1914	3	.	.	.	.	.	3	4	.	.	.	.	10	
1916	5	.	.	.	.	1	.	1	3	.	1	.	11	
1918	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.	.	3	
1920	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	
1922	7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	7	
1924	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	
1926	.	.	1	1	1	3	.	.	1	.	.	.	7	
1928	.	.	.	.	.	.	.	1	3	.	.	.	4	
1930	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1	
1932	1	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	3	
1934	.	.	.	.	1	.	3	.	3	1	.	.	8	
1936	.	.	.	.	2	4	4	2	.	.	.	.	12	
1938	.	.	.	3	5	5	.	1	1	.	.	.	15	
1940	.	.	.	7	16	24	19	5	3	1	.	1	76	
1942	.	.	.	9	20	15	8	4	.	.	.	.	56	
1944	.	.	.	7	19	12	4	2	.	.	.	.	44	
1946	.	.	.	1	7	5	4	2	1	.	.	.	20	
1948	.	.	.	.	2	8	6	3	1	.	.	.	20	
1950	.	.	.	.	5	7	5	2	1	.	.	.	20	
1952	.	2	1	1	5	12	7	2	.	.	.	.	30	
1954	.	.	1	10	13	5	5	2	.	.	.	.	36	
1956	1	1	2	3	8	9	2	.	.	.	.	.	26	
1958	.	1	3	5	9	9	4	4	.	.	.	.	35	
1960	.	.	.	2	10	13	4	3	1	.	.	.	33	
1962	.	.	.	.	2	4	7	1	.	.	.	.	14	
1964	.	.	.	.	2	5	2	1	.	.	.	.	10	
1966	.	1	.	.	.	9	5	2	1	.	.	.	18	
1968	.	.	.	.	.	4	7	1	.	.	.	.	12	
1970	.	.	.	2	1	2	6	.	.	.	.	.	11	
1972	.	.	.	.	3	3	5	1	1	.	.	.	13	
1974	.	.	.	2	3	5	3	2	1	.	.	.	16	
1976	.	.	1	12	13	7	4	1	2	.	2	1	43	
1978	.	1	.	4	5	28	6	3	.	.	.	.	47	
За весь период	100	7	9	70	153	211	137	56	34	7	3	2	786	

ТАБЛИЦА 4. Распределение землетрясений по глубине и времени в каталоге [6] 1900-1979 гг.

Год	Глубина, км										Всего за 2 года
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
1900	4	15	.	.	.	.	1	.	.	.	20
1902	1	10	.	.	.	.	3	.	.	.	14
1904	1	15	.	.	.	.	1	.	.	.	17
1906	.	17	.	.	.	.	.	.	.	.	17
1908	.	7	.	.	.	.	1	.	.	.	8
1910	3	17	.	.	.	.	.	.	.	.	20
1912	.	22	.	.	3	.	2	.	.	.	27
1914	.	6	.	.	.	1	3	.	.	.	10
1916	.	8	.	.	.	.	3	.	.	.	11
1918	.	.	.	.	.	1	2	.	.	.	3
1920	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1
1922	.	6	.	.	.	.	1	.	.	.	7
1924	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1
1926	4	2	.	.	.	.	1	.	.	.	7
1928	.	.	.	.	.	1	1	1	1	.	4
1930	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
1932	.	1	.	.	.	.	3	.	.	.	4
1934	1	.	.	.	1	.	3	3	.	.	8
1936	2	1	.	.	.	.	7	2	.	.	12
1938	.	1	.	.	.	1	13	.	.	.	15
1940	.	2	.	.	.	1	67	6	.	.	76
1942	1	1	.	2	.	3	46	3	.	.	56
1944	.	.	.	1	1	.	43	2	.	.	47
1946	.	.	.	.	.	.	19	1	.	.	20
1948	.	.	.	.	.	.	17	3	.	.	20
1950	1	.	.	.	.	1	16	1	1	.	20
1952	1	9	.	.	.	1	17	2	.	.	30
1954	.	1	1	.	.	1	24	5	2	2	36
1956	1	3	.	.	.	2	12	8	.	.	26
1958	1	5	1	.	.	3	16	8	.	1	35
1960	.	5	1	.	.	2	17	5	3	.	33
1962	.	4	.	.	.	2	6	2	.	.	14
1964	.	3	1	1	1	.	2	2	.	.	10
1966	2	1	1	.	3	1	5	5	.	.	18
1968	1	2	.	.	.	1	6	.	2	.	12
1970	1	3	1	.	.	.	4	2	.	.	11
1972	.	.	.	1	1	.	5	4	2	.	13
1974	.	4	1	1	1	.	1	8	.	.	16
1976	10	16	.	1	3	3	4	4	1	1	43
1978	11	10	2	.	1	3	10	8	2	.	47
За весь период	47	197	9	7	15	28	384	85	14	4	790

Представительность рассмотренного каталога [6] по магнитуде значительно хуже, чем каталога [7], поэтому его использование для надежного определения параметров алгоритма КН нежелательно.

Второй каталог – "Землетрясения в СССР" [5] – покрывает период с 1962 по 1990 г. и территорию 44–46°N, 24–28°E. В каталоге представлены два типа магнитуд – MpV , MLh и энергетический класс K , который связан с магнитудой по поверхностным волнам Ms [12] формулой

$$K = 1.8Ms + 4.$$

Каталог представлен начиная с магнитуды 3.0 ($K = 9.5$) (табл. 5; рис. 1, кривая 3). Глубина землетрясений от 0 до 200 км, поверхностные и промежуточные землетрясения хорошо разделены практически асейсмичной 50-километровой зоной с центром на глубине около 60 км (табл. 6).

В отличие от каталога [6] представительность каталога [5] ближе к представительности каталога [7]. В целом период 1962–1993 гг., покрываемый каталогами [5] и [7], представляется достаточным для корректного применения алгоритма КН.

СОСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО КАТАЛОГА

Объединение различных каталогов не является формальной процедурой. В качестве базового рассматривается каталог [7], так как именно он может служить основой для дальнейшего прогноза сильных землетрясений региона Вранча.

Каталог [7] содержит землетрясения только промежуточной глубины (начиная с 60 км), поэтому в каталогах [5] и [6] тоже рассматриваются землетрясения только промежуточной глубины. Каталог [6] рассматривается с 1932 г. (см. табл. 4), так как его представительность, особенно для землетрясений промежуточной глубины, заметно хуже до 1932 г.

В каталоге "Землетрясения в СССР" [5] содержится три типа магнитуд (см. предыдущий разд.), линейные соотношения между которыми имеют вид

$$Mk = 0.82MpV + 0.48; \quad Mk = 0.95MLh + 0.04,$$

т.е. все типы магнитуд достаточно хорошо соответствуют друг другу, что является основанием для использования максимальной магнитуды в каталоге [5].

Сильнейшие землетрясения региона Вранча, произошедшие в этом веке, приведены в табл. 7. Магнитуды, определенные различными авторами (см. колонки I и II данной таблицы), хорошо совпадают. Однако хорошего совпадения магнитуд сильных землетрясений недостаточно. Анализ наклона графиков повторяемости для каталогов [5–7] (см. рис. 1) показывает, что для [6] и [7] он практически совпадает (0.79 и 0.78, соответственно), что указывает на сходный тип магнитуды в этих каталогах. Для каталога [5] наклон графика повторяемости существенно меньше, чем для других каталогов, он равен 0.52.

Каталоги [5] и [7] частично пересекаются в интервале 1980–1990 гг., что дает возможность сопоставления магнитуд для одних и тех же событий, представленных в обоих каталогах. Имеется 184 таких землетрясения, для магнитуд которых была построена линейная регрессия (исключая три сильных землетрясения с магнитудой более 6.5):

$$M_{\max} = 0.58ML + 2.55,$$

где $M_{\max}$ – максимальная из магнитуд в каталоге [5], а ML – магнитуда в каталоге [7]. В соответствии с этой формулой была пересчитана магнитуда в каталоге [5] и вновь был определен наклон графика повторяемости – он становится равным 1.05, что также существенно отличается от наклона графиков повторяемости каталогов [6] и [7]. Следует отметить, что период, по которому определяется соотношение магнитуд, необычно активен – в течение этого времени произошли два сильнейших землетрясения (см. табл. 7). Не исключено, что сейсмический режим в рассмотренный период может отличаться от обычного для данного региона, поэтому вопрос о пересчете магнитуд требует более детального исследования. В данной работе мы отказались от пересчета магнитуды в каталоге [5], однако в дальнейшем предполагаем рассмотреть этот вопрос более детально.

ТАБЛИЦА 5. Распределение землетрясений по магнитуде и времени в каталоге [5]

Год	Магнитуда														Всего за год
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0		
1962	1	2	4	·	1	3	4	·	·	·	·	·	·	15	
1963	2	3	7	2	2	4	1	·	·	·	·	·	·	21	
1964	·	·	5	·	2	·	1	·	·	·	·	·	·	8	
1965	2	10	2	2	2	3	2	·	·	1	·	·	·	24	
1966	1	1	2	5	5	2	4	·	2	1	·	·	·	23	
1967	·	·	·	10	5	2	2	·	1	·	·	·	·	20	
1968	·	·	1	·	·	1	1	6	3	·	·	·	·	12	
1969	·	·	·	2	6	1	·	1	2	1	·	·	·	13	
1970	1	7	1	1	2	2	·	2	3	·	·	·	·	19	
1971	·	2	3	6	11	5	3	·	1	·	·	·	·	31	
1972	·	·	·	3	2	6	2	1	2	·	·	·	·	16	
1973	·	·	·	4	4	5	4	·	2	1	·	·	·	20	
1974	·	2	1	8	3	2	1	1	·	1	·	·	·	19	
1975	·	·	·	3	3	5	2	3	2	·	·	·	·	18	
1976	·	·	·	1	2	7	·	1	2	1	·	·	·	14	
1977	·	·	·	1	2	6	3	3	·	·	·	·	1	16	
1978	·	·	1	4	4	2	2	2	1	·	·	·	·	16	
1979	·	·	3	6	4	9	6	3	·	2	·	·	·	33	
1980	·	·	3	9	6	3	·	1	1	·	·	·	·	23	
1981	·	4	1	5	7	·	·	1	1	1	·	·	·	20	
1982	·	·	4	9	10	6	2	·	·	·	·	·	·	31	
1983	·	4	11	13	7	3	7	2	·	·	·	·	·	47	
1984	1	1	9	10	4	9	2	1	·	·	·	·	·	37	
1985	·	3	4	8	10	3	1	3	1	·	·	·	·	33	
1986	2	4	1	4	12	13	5	3	1	·	·	1	·	46	
1987	1	1	3	·	4	7	9	3	·	·	·	·	·	28	
1988	·	5	6	10	4	6	3	3	·	·	·	·	·	37	
1989	2	·	4	2	5	8	6	2	·	·	·	·	·	29	
1990	2	5	6	12	11	6	3	2	·	·	·	1	1	49	
За весь период	15	54	82	140	140	129	76	44	25	9	0	2	2	718	

ТАБЛИЦА 6. Распределение землетрясений по магнитуде и глубине в каталоге [5]

Глубина, км	Магнитуда													Всего на данной глубине
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
0	8	39	58	77	43	24	6	8	1	1	.	.	.	265
5	.	.	.	.	3	1	1	.	1	.	.	.	.	6
10	6	10	11	11	3	.	.	.	.	.	.	.	.	41
15	.	1	5	5	6	5	3	2	.	.	.	.	.	27
20	1	3	4	4	1	1	.	.	.	.	.	.	.	14
25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
30	.	1	3	1	2	4	2	1	1	.	.	.	.	15
35	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1
40	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
45	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1
50	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	2
55	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1
60	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	2
65	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1
70	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	2
75	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1
80	.	.	.	1	2	.	.	.	.	.	.	.	.	3
85	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	1
90	.	.	.	.	3	.	2	2	.	.	.	.	.	7
95	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	2
100	.	.	.	1	10	11	4	1	.	.	.	.	.	27
105	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	2
110	.	.	.	3	2	3	1	1	1	.	.	1	2	14
115	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	2
120	.	.	.	6	8	4	4	2	1	.	.	.	.	25
125	.	.	.	1	.	1	1	.	.	.	.	.	.	3
130	.	.	.	4	8	7	7	3	2	1	.	.	.	32
135	.	.	.	.	5	2	2	.	.	.	.	.	.	9
140	.	.	.	11	14	18	16	6	5	1	.	.	.	71
145	.	.	.	1	4	6	2	5	.	.	.	.	.	18
150	.	.	.	5	12	15	8	5	5	.	.	1	.	51
155	.	.	.	2	4	7	2	2	1	1	.	.	.	19
160	.	.	1	4	3	8	10	3	5	2	.	.	.	36
165	.	.	.	2	1	2	1	1	.	.	.	.	.	7
170	.	.	.	.	.	2	1	.	1	2	.	.	.	6
175	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
180	.	.	.	1	.	.	.	2	.	.	.	.	.	3
185	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
190	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
195	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
200	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1
На всех глубинах	15	54	82	140	140	129	76	44	25	9	0	2	2	718

В результате проведенного исследования был создан объединенный каталог, состоящий из трех частей: для периода 1980–1993 гг. – румынский локальный каталог [7], для периода 1962–1979 гг. – каталог "Землетрясения в СССР" [5], для периода 1932–1979 гг. – каталог [6]. Во всех трех частях каталога – землетрясения только с промежуточной глубиной очага (более 60 км). Из него мы выбрали каталог основных толчков, используя параметры, определенные в [4].

АЛГОРИТМ КН

Алгоритм КН основан на количественном анализе предвестниковых явлений, проявляющихся в потоке землетрясений перед возникновением сильного события.

Каждый момент времени представляется вектором, образованным значениями различных функций, описывающих поток землетрясений.

Функции отражают следующие свойства сейсмического потока:

- 1) уровень сейсмической активности,
- 2) вариации сейсмической активности во времени,
- 3) пространственно-временную кластеризацию землетрясений,
- 4) пространственную концентрацию очагов,
- 5) удаленное взаимодействие землетрясений.

Аналогичные явления наблюдаются во многих нелинейных системах перед коллапсом. В частности, отклик на возмущения возрастает, становится более хаотичным и действует на больших расстояниях. В данном случае такой нелинейной системой является система сейсмически активных разломов, а слабые землетрясения – источниками возмущения системы. Таким образом, согласно общей теории, перед сильным землетрясением, которое представляет собой разрушение системы, могут наблюдаться:

- 1) возрастание сейсмической активности как повышение отклика на возмущения,
- 2) кластеризация землетрясений в пространстве и во времени,
- 3) пространственная концентрация очагов,
- 4) возрастание вариаций сейсмичности, что отражает хаотичность отклика на возмущения,
- 5) удаленное взаимодействие землетрясений, которое может быть интерпретировано как увеличение радиуса влияния возмущения.

Алгоритм КН был разработан для региона Калифорния–Невада, а затем последовательно проверен во многих других регионах мира. Полученные результаты показывают: более 80% сильных землетрясений предваряются периодами повышенной вероятности (ППВ) сильных землетрясений, ППВ длятся около 25% всего времени (см. [4]). Подробное описание алгоритма КН можно найти в [3].

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КН ВО ВРАНЧЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одной из основных проблем применения алгоритма КН является выбор границ региона. В этом отношении регион Вранча является исключительным: территория хорошо выделяется по распределению землетрясений с промежуточной глубиной очага (см. рис. 2).

Сначала прогнозировались сильные землетрясения с магнитудой 6.4 и выше для периода 1962–1993 гг., так как здесь каталог более представительен, чем в предыдущий период. В соответствии с данными из табл. 7 (III) в течение изучаемого периода произошло три сильных землетрясения: в 1977 г. с $M = 7.1$, в 1986 г. с $M = 7.0$ и в 1990 г. с $M = 7.0$. Результаты диагностики ППВ представлены на рис. 3,а. Все три сильных землетрясения предвараются ППВ, длительность ППВ составляет 93.1 мес, или 27.9% от всего периода. Этот результат выглядит более успешным, чем в [4], где ППВ предварают два из трех сильных событий и занимает 39.4% рассматриваемого времени. Общая продолжительность ППВ составляет 118.1 мес (рис. 3,б).

Следующим шагом было применение алгоритма КН к данным за период с 1932 по 1962 г., для которого каталог представительен только с магнитуды 4. Такая представительность недостаточна для корректного определения параметров алгоритма КН, что может стать источником ошибок диагностики ППВ. Однако можно попытаться использовать для этого периода параметры, определенные для интервала с 1962 по 1993 г., что может также служить проверкой надежности этих параметров.

В этот дополнительный период времени произошло еще два сильных землетрясения: одно с $M = 7.2$ в 1940 г. и другое с $M = 6.4$ в 1945 г. ППВ предшествует землетрясению 1940 г., землетрясение 1945 г. является пропуском цели.

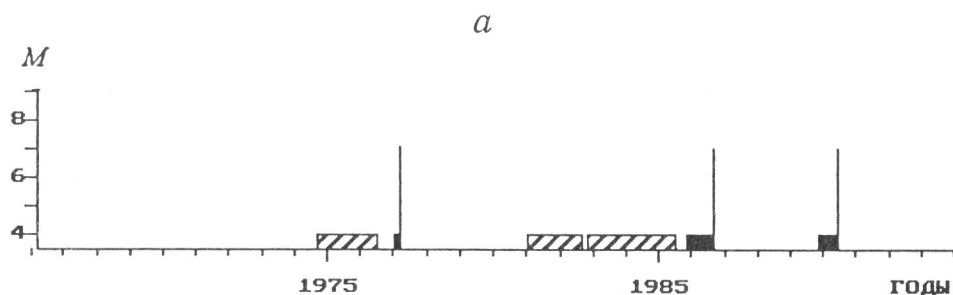
Таким образом, в период с 1932 по 1993 г. ППВ предшествуют четырем из пяти сильных землетрясений и занимают 21.7% общего периода времени, или 151.4 мес (рис. 4,а).

Несмотря на то что общая продолжительность ППВ невелика, имеется четыре ложные тревоги (рис. 4,а). Первая возникает после землетрясения 1945 г. с $M = 6.4$ (пропуск цели), вторая длится с 1948 по 1951 г. и не связана с каким-либо сильным землетрясением, так как в этот период не было событий с магнитудой больше 6. Две ложные тревоги 1981 и 1982 гг. вызваны короткими перерывами длинного ППВ, предшествующего сильному землетрясению 1986 г. Все ложные тревоги вызваны повышением сейсмической активности, которая проявляется в возникновении нескольких относительно сильных землетрясений, сопровождающихся большим числом афтершоков.

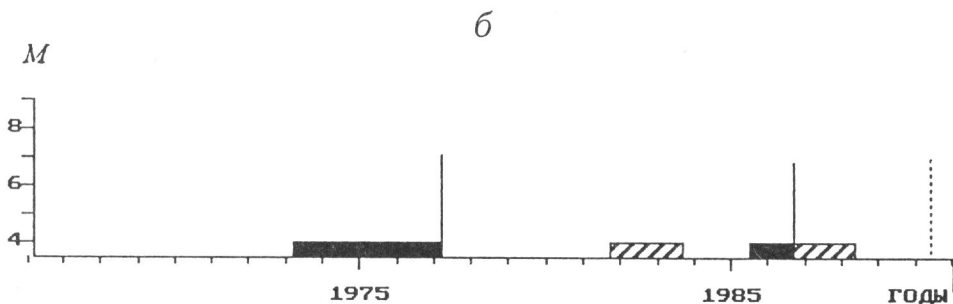
ТАБЛИЦА 7. Сильнейшие землетрясения региона Вранча с 1900 г.

Дата	Время		Координаты		Глубина, км	Магнитуда		
	ч	мин	$\varphi^{\circ}\text{N}$	$\lambda^{\circ}\text{E}$		I	II	III
10.11.1940	01	39	45.80	26.70	135	7.2	–	7.2
04.03.1977	19	21	45.78	26.80	110	7.2	7.1	7.1
30.08.1986	21	28	45.51	26.47	150	7.0	6.8	7.0
30.05.1990	10	40	45.83	26.74	110	7.0	7.1	7.0

Примечание. I – магнитуда по каталогам [6] и [7], II – по каталогу [5], III – по объединенному каталогу.



Начало ППВ	Сильные землетрясения		Конец ложной тревоги	Продолжительность ППВ, мес
	Дата	<i>M</i>		
01.09.1974			01.07.1976	22.0
01.01.1977	04.03.1977	7.1		2.1
01.01.1981			01.09.1982	20.0
01.11.1982			01.07.1985	32.0
01.11.1985	30.08.1986	7.0		10.0
01.11.1989	30.05.1990	7.0		7.0
				Общая: 93.1 мес

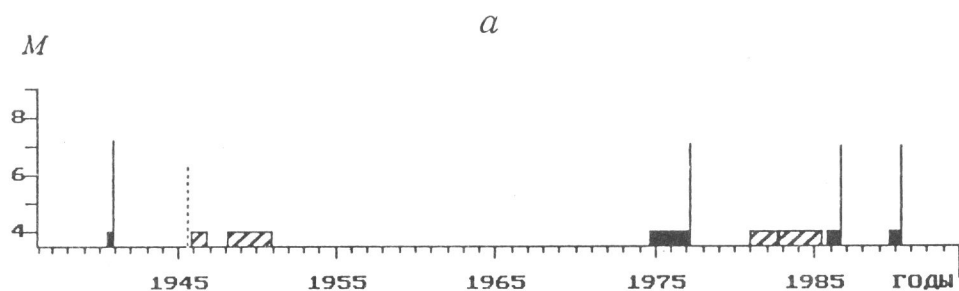


Начало ППВ	Сильные землетрясения		Конец ложной тревоги	Продолжительность ППВ, мес
	Дата	<i>M</i>		
01.01.1973	04.03.1977	7.1		50.1
01.09.1981			01.09.1983	24.0
01.09.1984	30.08.1986	6.8		24.0
30.08.1986			01.05.1988	20.0
	30.05.1990	7.1		пропуск цели
				Общая: 118.1 мес

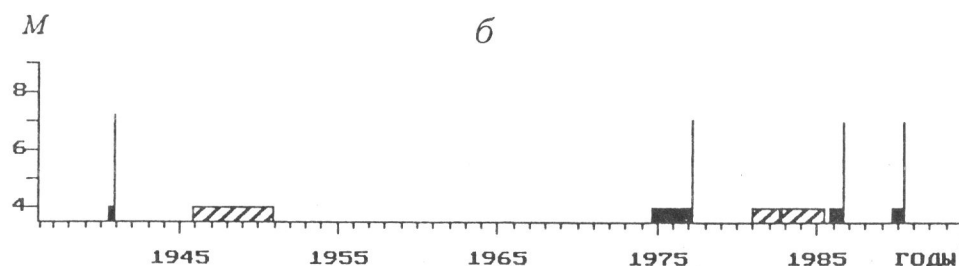
Рис. 3. Результаты применения алгоритма КН

a – для периода 1966–1993 гг. по объединенному каталогу, $M_0 = 6.4$; *б* – для периода 1966–1990 гг. по каталогу [6], $M_0 = 6.4$

Сплошная вертикальная линия – предсказанное сильное землетрясение, пунктирная – пропуск цели; ■ – успешный ППВ; ZZZ – ложный ППВ



Начало ППВ	Сильные землетрясения		Конец ложной тревоги	Продолжительность ППВ, мес
	Дата	M		
01.07.1940	10.11.1940	7.2		4.3
	07.09.1945	6.4		пропуск цели
01.11.1945			01.11.1946	12.0
01.03.1948			01.01.1951	34.0
01.09.1974	04.03.1977	7.1		30.1
01.01.1981			01.09.1982	20.0
01.11.1982			01.07.1985	32.0
01.11.1985	30.08.1986	7.0		10.0
01.09.1989	30.05.1990	7.0		9.0
				Общая: 151.4 мес



Начало ППВ	Сильные землетрясения		Конец ложной тревоги	Продолжительность ППВ, мес
	Дата	M		
01.07.1940	10.11.1940	7.2		4.3
01.11.1945			01.01.1951	62.0
01.09.1974	04.03.1977	7.1		30.1
01.01.1981			01.09.1982	20.0
01.11.1982			01.07.1985	32.0
01.11.1985	30.08.1986	7.0		10.0
01.09.1989	30.05.1990	7.0		9.0
				Общая: 167.4 мес

Рис. 4. Результаты применения алгоритма КН для периода 1936–1993 гг. по объединенному каталогу при $M_0 = 6.4$ (а) и $M_0 = 6.5$ (б).

Обозначения, как на рис. 3

С 1932 г. произошло четыре землетрясения с магнитудой 7.0–7.2, и только одно – с магнитудой 6.4, являющееся пропуском цели. Поэтому мы сделали попытку поднять порог магнитуды прогнозируемых землетрясений до 6.5. Получили следующий результат: все четыре сильных землетрясения предваряются ППВ, общая продолжительность ППВ возросла до 24% и составила 167.4 месяца (рис. 4, б). Возрастание общей продолжительности ППВ вызвано появлением длительной ложной тревоги, связанной с землетрясением 1945 г. с $M = 6.4$.

Рассмотрим, какие конкретные признаки проявились в потоке землетрясений перед каждым сильным толчком. Анализ предвестников показывает, что три из четырех предсказанных землетрясений (1940, 1977 и 1986 гг.) предварялись сейсмической активизацией, которая проявилась в возникновении нескольких относительно сильных землетрясений, сопровождающихся большим числом афтершоков. Поведение сейсмичности перед последним сильным землетрясением 1990 г. отличается – основным предвестником этого землетрясения было сейсмическое затишье. В качестве примера на рис. 5 приведены графики двух стандартных функционалов алгоритма КН: N и Σ . Таким образом, реализуются различные сценарии процесса подготовки сильных землетрясений в регионе Вранча, что оправдывает применение такого сложного алгоритма, как КН.

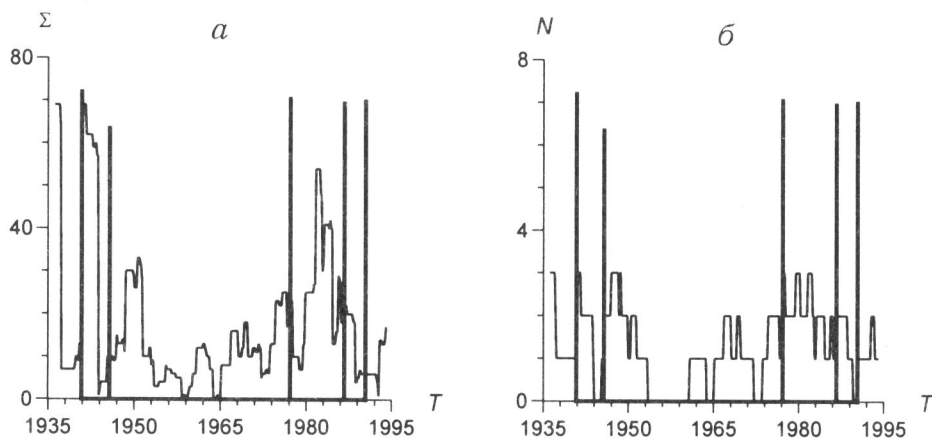


Рис. 5. Графики функционалов Σ (а) и N (б) алгоритма КН и сильные землетрясения региона Вранча. Высота вертикальных линий соответствует магнитуде сильного землетрясения

ВЫВОДЫ

Регион Вранча не является типичным для применения алгоритма КН. Обычно этот алгоритм используется для предсказания поверхностных землетрясений на территории с линейными размерами в сотни километров. Во Вранче основная сейсмичность сосредоточена на очень небольшой территории и на промежуточной глубине.

В этой работе показано, что алгоритм КН может применяться для прогноза сильных землетрясений с промежуточной глубиной очага и с использованием сей-

смичности только этой глубины в отличие от [4], где для анализа использовалась и поверхностная сейсмичность. Результаты ретроспективного прогноза дают возможность продолжать мониторинг подготовки сильных землетрясений во Вранче по данным румынской локальной сети в случае их регулярного пополнения без существенного ухудшения качества каталога.

Дополнение. В процессе работы над статьей было получено продолжение каталога для периода с января 1994 г. по май 1995 г. Эти данные были тестированы, новых тревог за этот период не возникло.

Благодарности. Авторы благодарны И.М. Ротвайн за полезное обсуждение и М. Попа за помощь в работе с румынским каталогом землетрясений. Работа выполнена при поддержке фонда ИНТАС (грант INTAS 93-457), Международного научного фонда (грант МВ3300) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-05-14083).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Enescu D., Marza V., Zamarca I.* Contributions to the statistical prediction of Vrancea earthquakes // *Rev. Roum. Geophys.* 1974. N 18. P.67-79.
2. *Enescu D., Ianas M.* Attempts at predicting earthquakes in Vrancea for the periods 1976-1980 and 1981-1990 // *Rev. Roum. Geophys.* 1975. N 19. P.27-35.
3. *Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M.* Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in different regions of the World: Algorithm CN // *Phys. Earth. Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.57-72.
4. *Дмитриева О.Е., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г., Кузнецов И.В. и др.* Диагностика периодов повышенной вероятности сильных землетрясений в сейсмоопасных регионах СССР и ряда других стран // Численное моделирование и анализ геофизических процессов. М.: Наука, 1987. С.99-111. (Вычисл. сейсмология; Вып.20).
5. *Землетрясения в СССР, 1962-1990.* М.: Наука.
6. *Radu C.* Catalogue of strong earthquakes originated on the Romanian territory. Part II: 1901-1979 // *Seismological researches on the earthquake of March 4, 1977.* Central Institute of Physics, Bucharest. 1979.
7. *Trifu C.-I., Radulian M.* A depth-magnitude catalog of Vrancea intermediate depth microearthquakes // *Rev. Roum. Geophys.* 1991. Vol.35. P.35-45.
8. *Fuchs K., Bonjer K.P., Bock G., Radu C. et al.* The Romanian earthquake of March 4, 1977. II. Aftershocks and migration of seismic activity // *Tectonophysics.* 1978. Vol.53. P.225-247.
9. *Onescu M.C.* Deep structure of the Vrancea region, Romania, inferred from simultaneous inversion for hypocenters and 3-D velocity structure // *Ann. Geophys.* 1984. Vol.2. P.23-28.
10. *Constantinescu L., Enescu D.* A tentative approach to possibly explaining the occurrence of the Vrancea earthquakes // *Rev. Roum. Geol., Geogr., Geophys.* 1984. Vol.28. P.19-32.
11. *Trifu C.-I., Radulian M., Popescu E.* Characteristics of intermediate depth microseismicity in Vrancea region // *Rev. Roum. Geophys.* 1990. Vol.46. P.75-82.
12. *Раутман Т.Г.* Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // *Тр. ИФЗ АН СССР.* 1956. Т.32(199). С.88-93.