

АЛГОРИТМ КОЗ В РАЙОНЕ ВОДОХРАНИЛИЩ КОЙНА-ВАРНА, ИНДИЯ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Завьялов А.Д.¹, Смирнов В.Б.^{1,2}, Пономарев А.В.¹, Чада Р.К.³, Шринагеш Д.³

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия, zavyalov@ifz.ru*

² *МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

³ *Национальный геофизический исследовательский институт, Хайдарабад, Индия*

Введение

В данной статье представлены результаты, полученные в ходе создания карт ожидаемых землетрясений (КОЗ), для района водохранилищ Койна-Варна. Этот район интересен тем, что до строительства плотины Койна на севере (рис. 1) и заполнения соответствующего водохранилища (начало заполнения 1961 г.) он считался асейсмичным и инструментальных сейсмических наблюдений в нем не проводилось. Однако 10 декабря 1967 г. здесь неожиданно возникло сильнейшее землетрясение с $M_L = 6.5$, получившее название землетрясения Койна и ставшее классическим примером землетрясения, произошедшего в результате деятельности человека. Аналогичная ситуация повторилась и в результате строительства плотины Варна (южнее плотины Койна) и заполнения его водохранилища (начало заполнения 1985 г.). Таким образом, вот уже почти 50 лет в районе наблюдается сейсмическая активность, и ведутся сейсмические наблюдения.

Район Койна-Варна характеризуется переходным режимом сейсмического процесса, важной чертой которого является недостаточная длительность периода наблюдений, небольшие размеры района исследований и, следовательно, малое число сейсмических событий в каталоге. В процессе работы удалось преодолеть трудности, связанные со сравнительно коротким периодом инструментальных наблюдений и малым числом землетрясений в каталоге. Такая работа выполнена впервые. Ранее карты ожидаемых землетрясений строились только для сейсмоактивных районов с явно выраженной тектонической активностью: континентальных окраин, островных дуг, зон субдукции и т.д.

Исходные данные и выбор параметров

В качестве информационной базы для выполнения этой работы был использован локальный каталог землетрясений района Койна-Варна, покрывающий временной интервал с 1996 по 2012 гг. (около 17 лет) и включающий 4500 землетрясений с магнитудами $M_L = 0-6.5$, произошедшими в интервале глубин $H = 0-20$ км. Линейные размеры зоны сейсмической активности составляют 40×60 км. Около половины всех землетрясений каталога составляют афтершоки землетрясений с $M_L \geq 4$. При расчете пространственно-временных распределений величин предвестниковых параметров и карт ожидаемых землетрясений афтершоки из каталога не исключались. В качестве представительной магнитуды была выбрана $M_c = 2.1$, и во всех последующих расчетах параметров сейсмического режима использовались все землетрясения с магнитудами $M_L \geq 2.1$, которые регистрировались без пропусков, начиная с 1996 г. на всей территории района Койна-Варна. Средние значения погрешностей локаций составляют около 1 км для эпицентров и около 3 км для гипоцентров.

В районе Койна-Варна был использован стандартный набор прогностических параметров сейсмического режима (динамические признаки), который используется и для построения КОЗ сейсмоактивных регионов с явно выраженной тектонической активностью: наклон графика повторяемости b -value, число землетрясений в виде относительных сейсмических затиший Nq , число землетрясений в виде активизации сейсмичности Na , выделившаяся сейсмическая энергия в виде энергетических затиший Eq , выделившаяся сейсмическая энергия в виде энергетических затиший Ea , плотность сейсмогенных разрывов $K_{ср}$. Каждый из параметров и их математические определения подробно описаны в [2]. Все динамические прогностические признаки, за исключением параметра концентрации сейсмогенных разрывов $K_{ср}$, который имеет кумулятивный характер и является пороговой величиной, представлялись в виде пространственно-временных распределений аномальных отклонений от соответствующего долговременного (фоновое) уровня, нормированных на величину среднеквадратической ошибки его определения (так называемый ξ -параметр). Расчет пространственно-временных распределений параметров сейсмического режима производился в перекрывающихся наполовину прямоугольных ячейках сетки $\Delta X \times \Delta Y$. В качестве базового варианта, мы выбрали размер пространственной ячейки равным 10×10 км. При расчетах распределений параметра $K_{ср}$ базовый размер ячейки был установлен 5×5 км. Величина скользящего временного окна ΔT_r для расчета текущих значений прогнозных признаков была выбрана $\Delta T_r = 3$ года с шагом $\Delta t = 3$ мес.

В связи с отсутствием данных о стационарных прогностических признаках для территории Койна-Варна они в работе не использовались. Разработанная методика расчета КОЗ допускает такой

подход.

За период 1996-2012 гг. в исследуемом районе произошло 26 землетрясений и их групп с магнитудами $M_L \geq 4.0$ (табл. 1). Прогноз землетрясений этого магнитудного диапазона представляет интерес, как в социально-экономическом, так и научном плане, а их количество достаточно для построения статистических выводов. Среди этих землетрясений 4 группы событий были наиболее сильными. Они включают в себя землетрясения с $5.0 \leq M_L < 5.5$. 7 групп включают землетрясения с $4.5 \leq M_L < 5.0$.

Таблица 1. Результаты ретроспективного прогноза землетрясений с $M_L \geq 4.0$, произошедших в районе Койна-Варна с 1996.01.01 по 2012.11.30

№ п/п	Дата	Время	Географические координаты, град.		Глубина, км <i>H</i>	Магнитуда M_L	Прогностический признак					
			Широта	Долгота			<i>b</i>	<i>Nq</i>	<i>Na</i>	<i>Eq</i>	<i>Ea</i>	<i>Kcp</i>
1	1996.04.26	12:19:32	17.17	73.71	7	4.4						
2	1997.04.25	16:22:53	17.35	73.76	3	4.4						
3	1998.02.11	01:08:47	17.17	73.77	6	4.3						+
	1998.02.14	00:59:49	17.15	73.73	10	4.2						+
4	1999.06.07	15:45:01	17.27	73.76	2	4.7			+			+
5	2000.03.12	18:03:54	17.20	73.72	12	5.2		+	+		+	+
6	2000.04.06	22:30:12	17.14	73.67	2	4.8						
7	2000.09.05	00:32:43	17.20	73.77	14	5.3		+				+
8	2000.12.08	13:23:05	17.11	73.74	7	4.1		+	+	+		+
9	2001.05.17	16:04:27	17.19	73.74	8	4.0			+		+	
10	2001.08.02	04:08:52	17.13	73.76	5	4.0		+	+	+		+
11	2003.03.27	06:18:23	17.34	73.79	8	4.1			+		+	
12	2005.03.14	09:43:48	17.14	73.76	3	5.0	+	+	+	+	+	+
	2005.03.15	02:07:07	17.18	73.76	10	4.2	+	+	+		+	+
	2005.03.26	00:56:36	17.16	73.77	2	4.0						
13	2005.06.07	21:32:06	17.24	73.72	14	4.2	+	+	+		+	+
14	2005.08.30	08:53:17	17.19	73.79	5	4.5						+
15	2005.11.20	18:50:41	17.20	73.76	5	4.0						+
16	2005.12.26	10:46:05	17.16	73.76	12	4.2						+
17	2006.04.17	16:39:59	17.16	73.77	8	4.6			+			+
18	2007.08.20	19:15:53	17.18	73.78	2	4.0			+		+	+
19	2007.11.24	10:57:48	17.14	73.79	9	4.3	+		+		+	+
20	2007.11.24	11:35:45	17.12	73.7	5	4.0		+			+	+
21	2008.07.29	19:10:51	17.31	73.74	4	4.2						+
22	2008.09.16	21:47:13	17.31	73.72	14	4.8						
23	2009.11.14	13:03:34	17.14	73.79	4	4.7	+	+	+		+	+
	2009.11.14	13:34:35	17.12	73.78	3	4.0						+
24	2009.12.12	11:51:25	17.13	73.78	5	5.1			+			+
	2009.12.12	16:25:41	17.16	73.8	12	4.3	+				+	+
25	2009.12.23	03:49:29	17.12	73.78	3	4.0						
26	2012.04.14	05:27:41	17.33	73.74	12	4.8		+		+		+
Общее число предсказанных землетрясений, <i>Npr</i>							6	10	14	4	11	23
							(23)	(23)	(23)	(23)	(23)	(26)
Общее число предсказанных землетрясений в %%							26.1	43.5	60.9	17.4	47.8	88.5
$M_L \geq 5.0$							2 (4)	3 (4)	3 (4)	1 (4)	3 (4)	4 (4)
$4.5 \leq M_L < 5.0$							1 (7)	2 (7)	2 (7)	1 (7)	1 (7)	4 (7)
$4.0 \leq M_L < 4.5$							2	4	7	2	6	11
							(12)	(12)	(12)	(12)	(12)	(15)

Примечание: В скобках приведены значения общего числа землетрясений соответствующих магнитуд.

Расчет ретроспективных статистических характеристик параметров сейсмического режима

Расчеты ретроспективных статистических характеристик предвестниковых параметров выполнялись для различных уровней тревоги, задаваемых исследователем, с последующим экспертным отбором тех значений, при которых прогнозная эффективность (отношение средней плотности потока сильных землетрясений во время тревог (или на площади тревог) к их средней плотности за время наблюдений (или на площади наблюдений) конкретного предвестника наиболее адекватно отвечала поставленной задаче: либо наибольшее число предсказанных землетрясений при достаточно большом

времени тревог, либо меньшее число предсказанных сильных землетрясений при малом времени тревог (стратегия Г.М. Молчана). Расчеты проводились по методике, описанной в [2]. В табл. 2 показаны ретроспективные статистические характеристики предвестников с уровнями тревог, выбранными экспертом для использования в дальнейших расчетах. Заметим, что эффективность большинства прогнозных признаков J для выбранных уровней тревоги оказалась более 3, т.е. эти признаки можно рассматривать как «весьма полезные» (см. табл. 3.2 в [2]). Эффективность только одного признака ξ_{ea} оказалась примерно в 2 раза ниже и равной $J = 1.58$, что соответствует классификации «полезный».

Результаты использования каждого признака для прогноза землетрясений с $M_L \geq 4.0$ в районе водохранилищ Койна-Варна собраны в табл. 1. Из ее рассмотрения можно сделать следующие основные выводы:

1. Только группа землетрясений под № 12, состоящая из 3 событий, сильнейшее из которых имело магнитуду $M_L=5.0$, предварялось аномальными статистически значимыми значениями всех 6 прогнозных признаков.
2. Из общего числа землетрясений только 5 землетрясений (№№ 1, 2, 6, 22, 25) не предварялись аномалиями по какому-либо признаку.
3. Все 4 группы землетрясений, в число которых входят наиболее сильные события с $M_L \geq 5.0$, предварялись аномалиями по ряду признаков.
4. Из всех прогнозных признаков наиболее успешным по числу предсказанных землетрясений является плотность сейсмогенных разрывов K_{cp} . При его использовании 88.5% землетрясений с $M_L \geq 4.0$ было спрогнозировано.

Время действия карты ожидаемых землетрясений, полученное усреднением времен ожидания по всем 6 признакам $\xi_b, \xi_{nq}, \xi_{na}, \xi_{eq}, \xi_{ea}, K_{cp}$ с выбранными уровнями тревоги, составило $\Delta T_{КОЗ}=2.13\pm 0.94$ лет, а площадь ожидания землетрясения с $M_L \geq 4.0 - \tilde{S}_{ож}^k = 152\pm 17$ км² (табл. 2).

Таблица 2. Ретроспективные статистические характеристики прогнозных признаков перед землетрясениями с $M_L \geq 4.0$, произошедшими в районе Койна-Варна с 1996.01.01 по 2012.09.30

Параметр K_i	Уровень тревоги	Вероятность обнаружения $P(K_i D_1)$	Вероятность ложной тревоги $P(K_i D_2)$	Среднее время ожидания, годы $T_{ож,ср}\pm\sigma_T$	Средняя площадь ожидания, км ² $S_{ож,ср}\pm\sigma_S$	Реальное число предсказанных землетрясений	Число ложных тревог / Число пропусков цели	Эффективность прогноза по времени J_T
ξ_b	+2.0 σ	0.1190	0.0211	1.5 \pm 1.1	133 \pm 26	6	10/71	3.84
ξ_{nq}	-2.0 σ	0.2024	0.0227	1.8 \pm 2.2	133 \pm 47	10	2/66	5.39
ξ_{na}	+2.0 σ	0.3929	0.0100	2.6 \pm 2.5	164 \pm 40	14	0/45	4.78
ξ_{eq}	-1.2 σ	0.1310	0.0358	1.9 \pm 1.7	175 \pm 61	4	3/71	3.41
ξ_{ea}	+1.5 σ	0.2500	0.1431	3.8 \pm 3.0	145 \pm 42	11	13/59	1.58
K_{cp}	11.7	0.5684	0.1508	1.2 \pm 1.1	161 \pm 50	23	35/41	2.92

Примечание: Размер сетки: 10x10 км для параметров $\xi_b, \xi_{nq}, \xi_{na}, \xi_{eq}, \xi_{ea}$ и 5x5 км для параметра K_{cp} .

Расчет безусловной вероятности возникновения сильного землетрясения

Для расчета величины безусловной вероятности возникновения сильного землетрясения в пространственной ячейке выбранных размеров используются данные о сильных землетрясениях (и их группах), произошедших в исследуемом районе за время наблюдений (табл. 1). При этом пространственные ячейки должны быть **не перекрывающимися (независимыми)**. Каждое сейсмическое событие (или группа событий) представляется не точкой, соответствующей гипоцентру, а некоторой областью подготовки, в которой наблюдаются характерные изменения геофизических полей. В качестве оценки величины области подготовки землетрясений, в первом приближении, можно принять среднюю величину площади ожидания сильного землетрясения для комплекса прогностических признаков $\tilde{S}_{ож}^k$. Тогда среднее число сильных землетрясений и их групп, возникающих на площади ожидания $\tilde{S}_{ож}^k$ за время ожидания (время действия КОЗ) $\Delta T_{КОЗ}$, будет равно $\lambda = \frac{\tilde{S}_{ож}^k}{S_n} \cdot \frac{\Delta T_{КОЗ}}{T_n} \cdot N_{общ}$, где $N_{общ}$ – общее число сильных землетрясений и их групп; T_n – период наблюдений, за время которого произошло $N_{общ}$ событий; S_n – площадь наблюдений, на которой произошло $N_{общ}$ событий. Назовем величину λ интенсивностью потока сильных землетрясений.

Если предположить, что поток сильных землетрясений подчиняется распределению Пуассона (в первом приближении этого достаточно), то безусловная вероятность возникновения **одного** силь-

ного землетрясения на площади ожидания $\tilde{S}_{ожс}^{\kappa}$ за время ожидания $\Delta T_{КОЗ}$ будет равна [1] $P(D_1) = \text{lex} \square (-\lambda)$. Соответственно, $P(D_2) = 1 - P(D_1)$ – вероятность того, что землетрясение не произойдет. Полученное значение величины безусловной вероятности возникновения сильного землетрясения $P(D_1)$ присваивается каждой пространственной ячейке сетки. В нашем случае, подставляя необходимые значения параметров, получим $P(D_1)=0.1698$. Тогда $P(D_2)=0.8302$. Значения $P(D_1)$ приписывались каждой прямоугольной ячейке сетки, покрывающей регион исследований.

Расчет и первичный анализ карт ожидаемых землетрясений для района Койна-Варна

Совокупность значений условной вероятности $P(D_1|K)$ для всех пространственных ячеек сетки, получила название Карты Ожидаемых Землетрясений на период времени $[t_0, t_0 + \Delta T_{КОЗ}]$, где $\Delta T_{КОЗ}$ – время действия КОЗ. Предполагается, что возникновение сильного землетрясения в этом временном интервале равновероятно. Однако, здесь уместно упомянуть работу М.О.Куценко, А.Д.Завьялова [3], в которой показано, что возникновение землетрясений в разные годовые интервалы времени ожидания не равновероятно. Оказалось, что возникновение сильных землетрясений наиболее вероятно в первые годы после появления предвестника. Практически для всех предвестников вероятность возникновения сильных события в первый год составила 25%, а в первые 5 лет – более 70%. Отметим, что эта работа была выполнена на материале каталогов тектонических землетрясений из разных сейсмоактивных регионов мира.

Для района Койна-Варна была рассчитана серия из 42 карт ожидаемых землетрясений, начиная с 2002.07.01 по 2012.10.01 с шагом 3 месяца с прогнозным периодом 2 года для каждой карты. Период с 1996.01.01 по 2002.06.30 (6.5 лет) был использован для обучения алгоритма и поэтому землетрясения, произошедшие в это время, в оценке ретроспективных результатов прогноза и эффективности алгоритма КОЗ не участвовали. Последняя карта в этой серии имеет прогнозный период с 2012.10.01 по 2014.09.30 и является объектом для проверки прогноза в реальном масштабе времени (рис. 1). Из рис. 1 следует, что наиболее опасными являются 2 района: один располагается южнее водохранилища Койна, а второй, более обширный – севернее водохранилища Варна. В настоящее время мы не располагаем данными о землетрясениях с $M_L \geq 4.0$, произошедших в исследуемом районе.

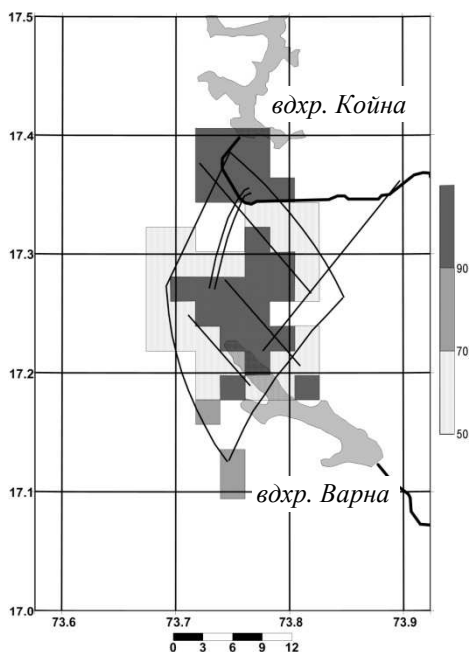


Рис. 1. Карта ожидаемых землетрясений на период 2012.10.01-2014.09.30.

На каждую карту ожидаемых землетрясений наносились все землетрясения с $M_L \geq 4.0$, произошедшие в течение ее прогнозного периода и рассчитывалась площадь тревожных зон с разным уровнем условной вероятности $P(D_1|K)$. Типичная карта ожидаемых землетрясений для района Койна-Варна на двухлетний период 2003.10.01-2005.09.30 представлена на рис. 2а. Еще одна КОЗ с другим прогнозным периодом показана на рис. 2б. На обеих картах сильные землетрясения возникли в зонах с уровнем условной вероятности $P(D_1|K) \geq 90\%$ в течение прогнозного периода.

Результаты анализа всей серии рассчитанных КОЗ сведены в табл. 3. Из нее следует, что за период ретроспективного прогноза 2003.01.01 по 2012.09.30 при уровне условной вероятности $P(D_1|K) \geq 90\%$, который более чем в 5 раз превышает уровень безусловной вероятности, были спрогнозированы оба наиболее сильнейших землетрясения с $M_L \geq 5.0$ (№№ 12, 24), 3 землетрясения из 5 из диапазона $4.5 \leq M_L < 5.0$ (№№ 14, 23, 26), и 5 из 9 землетрясений с $4.0 \leq M_L < 4.5$ (№№ 13, 15, 19, 25). В целом из 16 произошедших сильных землетрясений в зоне с $P(D_1|K) \geq 90\%$ произошло 9 (56.3%). При этом площадь, района наблюдений S_n с уровнем сейсмической активности $0.1 \frac{1}{20d}$, оказавшаяся в зоне с 90% уровнем

условной вероятности составила $20.4 \pm 8.4\%$. Интегральная прогнозная эффективность алгоритма КОЗ на этом уровне условной вероятности составила $J_{КОЗ} = 2.76$. В табл. 3 приведены аналогичные данные и для других уровней условной вероятности 50% и 70%.

Выводы

В статье описаны расчеты КОЗ для района Койна-Варна и дан первичный анализ полученных результатов. Выполнен ретроспективный анализ прогнозности каждого из сейсмологических предвестников, использованных в алгоритме КОЗ. Оказалось, что из всех прогнозных призна-

ков наиболее успешным по числу предсказанных землетрясений является плотность сейсмогенных разрывов K_{cp} . Получена оценка величины безусловной вероятности возникновения сильного землетрясения в ячейках сетки $P(D_1) = 0.1698$.

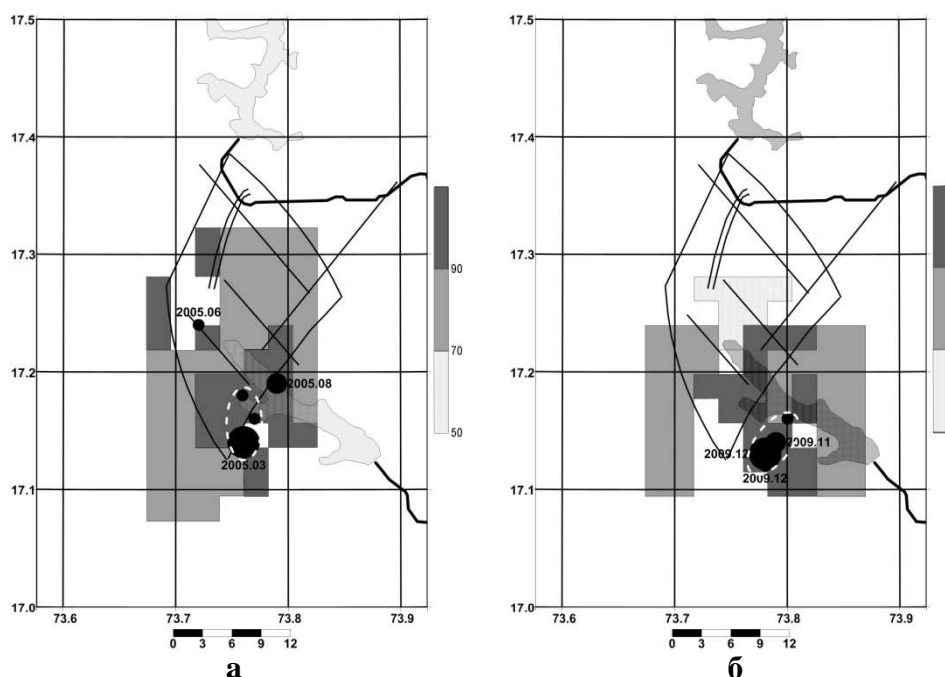


Рис. 2. Карта ожидаемых землетрясений (карта распределения условной вероятности) на период 2003.10.01-2005.09.30 (а) и 2009.01.01-2010.12.31 (б). На картах нанесены эпицентры землетрясений и их групп с $M_L \geq 4.0$, произошедшие в течение времени действия КОЗ (2 года). Размер кружков пропорционален длине разрыва в очаге соответствующего землетрясения в масштабе карты. Пунктирный эллипс объединяет группу землетрясений, произошедших 2005.03.14-26 (а) и 2009.12.12-23 (б).

Полученные впервые результаты применения алгоритма КОЗ в классическом районе с переходным режимом сейсмичности оказались обнадеживающими. Они показали его достаточно высокую прогнозную эффективность, оказавшуюся равной $J_{КОЗ} = 2.76$. В зонах с уровнем условной вероятности $P(D_1|K) \geq 90\%$ произошло 56.3% всех землетрясений $M_L \geq 4.0$. При этом площадь тревог составила $20.4 \pm 8.4\%$ от общей площади наблюдений. Особенно эффективно алгоритм КОЗ проявил себя в прогнозе наиболее сильных землетрясений региона Койна-Варна, произошедших за период ретроспективного прогноза. Возможно, что в дальнейшем более тщательная настройка параметров алгоритма позволит увеличить интегральный показатель эффективности прогноза.

Получена карта ожидаемых землетрясений на период с 2012.10.01 по 2014.09.30, которая явится объектом для проверки прогноза в реальном масштабе времени.

Таблица 3. Результаты ретроспективного прогноза землетрясений с $M_L \geq 4.0$, произошедших в районе Койна-Варна с 2002.07.01 по 2012.11.30, с использованием КОЗ

Диапазон магнитуд	Уровень условной вероятности, $P(D_1 K)$		
	50 %	70 %	90%
$M_L \geq 5.0$	2/2	2/2	2/2
$4.5 \leq M_L < 5.0$	4/5	3/5	3/5
$5.0 \leq M_L < 4.5$	7/9	6/9	4/9
Число предсказанных землетрясений, $N_{пр}$	13	11	9
Общее число произошедших сильных землетрясений, $N_{общ}$	16		
Число предсказанных землетрясений в %%	81.3	68.8	56.3
Средняя площадь тревог \tilde{S}_{mp} / S_n в %%	40.5 ± 7.6	36.6 ± 8.8	20.4 ± 8.4
Эффективность КОЗ $J_{КОЗ}$	2.01	1.88	2.76

Список литературы

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
2. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
3. Куценко М.О., Завьялов А.Д. Вероятность землетрясения на интервале времени ожидания по комплексу прогностических признаков // Материалы 12-ой Уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь, 21-25 марта 2011 г. С. 131-136.