

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*
- 2 – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
- 3 – Национальный геофизический исследовательский институт, Хайдарабад, Индия*



Работа поддержана проектом «*Переходные геофизические процессы в областях природных и техногенных воздействий: полевые наблюдения и физическое моделирование*» в рамках Комплексной долгосрочной программы (КДП) сотрудничества в области науки, техники и инноваций между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Индия.

Введение

Алгоритм **К**арта **О**жидаемых **З**емлетрясений (**КОЗ**) был предложен в 1984 г. *Г.А.Соболевым, Т.Л.Челидзе, А.Д.Завьяловым и Л.Б.Славиной*. В его основе лежат представления о процессе разрушения геологической среды как самоподобной и самоорганизованной системы разномасштабных блоков горных пород.

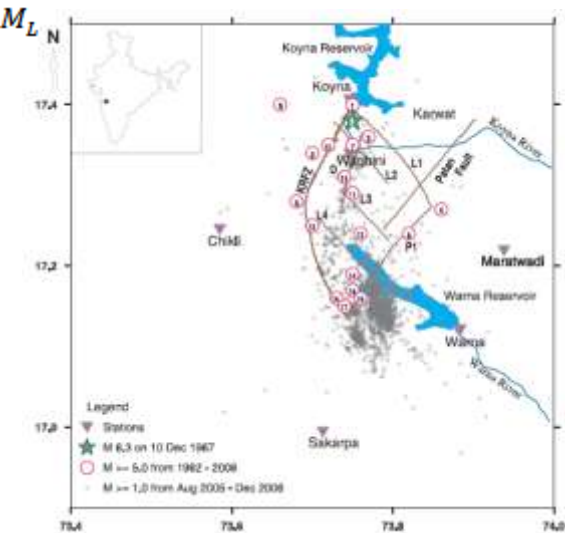
Основываясь на **кинетической концепции прочности твердых тел**, авторам **удалось составить образы аномального поведения различных сейсмологических параметров (предвестников)** перед сильными ($M \geq 5.5$) землетрясениями.

Алгоритм КОЗ использует принцип пространственно-временного сканирования каталога землетрясений в пределах исследуемого сейсмоактивного региона.

Используя Байесовский подход, рассчитываются карты распределения условной вероятности $P(D1|K)$ возникновения сильного землетрясения в каждой пространственно-временной ячейке. Эти карты получили название **К**арт **О**жидаемых **З**емлетрясений (**КОЗ**).

В течение последних 30 лет алгоритм КОЗ был протестирован на региональных каталогах **Кавказа, Камчатки, Копет-Дага, Киргизии, Южной Калифорнии, Северо-Восточного и Юго-Западного Китая, Греции, Западной Турции, Курильских о-вов, Новой Зеландии.**

Настоящий доклад является продолжением этой серии работ.



Однако в нем впервые предпринята попытка использовать алгоритм среднесрочного прогноза землетрясений КОЗ для построения карт ожидаемых землетрясений в классическом районе с переходным режимом сейсмичности – район водохранилищ Койна-Варна, Индия.

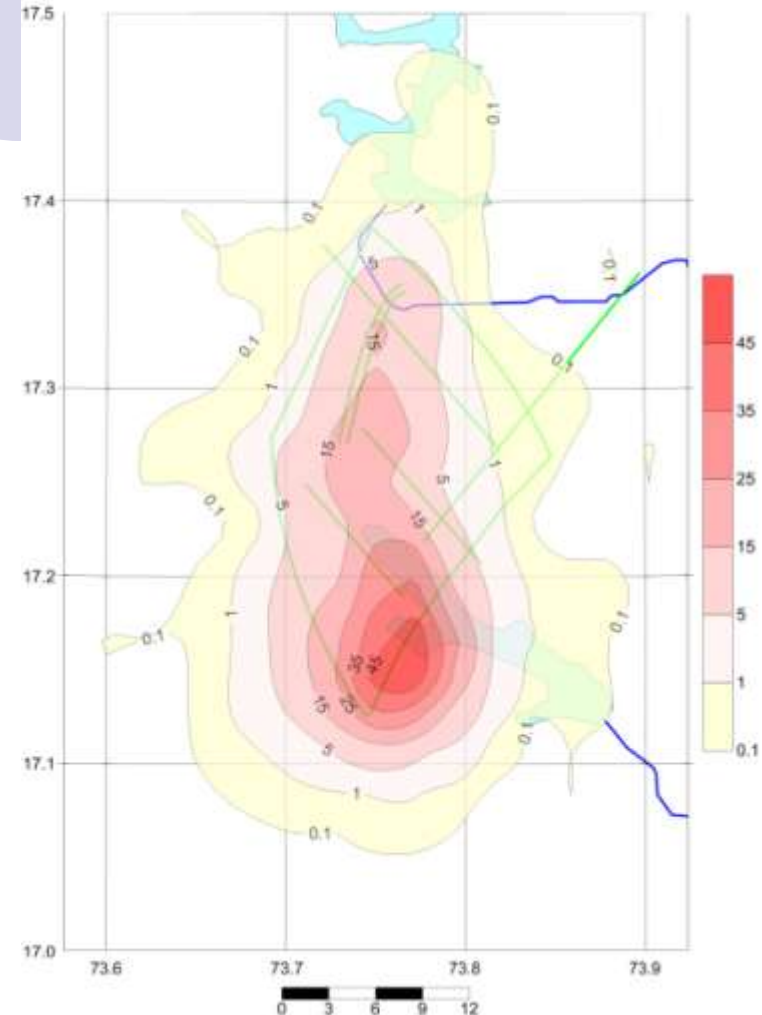
Этот район интересен тем, что до строительства **плотины Койна** на севере и заполнения соответствующего водохранилища (начало заполнения 1961 г.) он считался асейсмичным и инструментальных сейсмических наблюдений в нем не проводилось. Однако **10.12.1967** здесь неожиданно возникло сильнейшее землетрясение с $M_L=6.5$, получившее название **землетрясения Койна** и ставшее классическим примером землетрясения, возникшего 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.

Использованные данные

Имеющийся в нашем распоряжении каталог землетрясений Койна-Варна покрывает временной интервал с **1964.10.28 по 2012.11.30** (около 48 лет) и включает **9733** события с магнитудами $M_L=0-6.5$, произошедшими в интервале глубин $H=0-36.8$ км. Подавляющее количество землетрясений располагается между водохранилищами и имеет тенденцию к смещению южнее водохранилища Варна. Линейные размеры зоны сейсмической активности составляют 40×60 км.

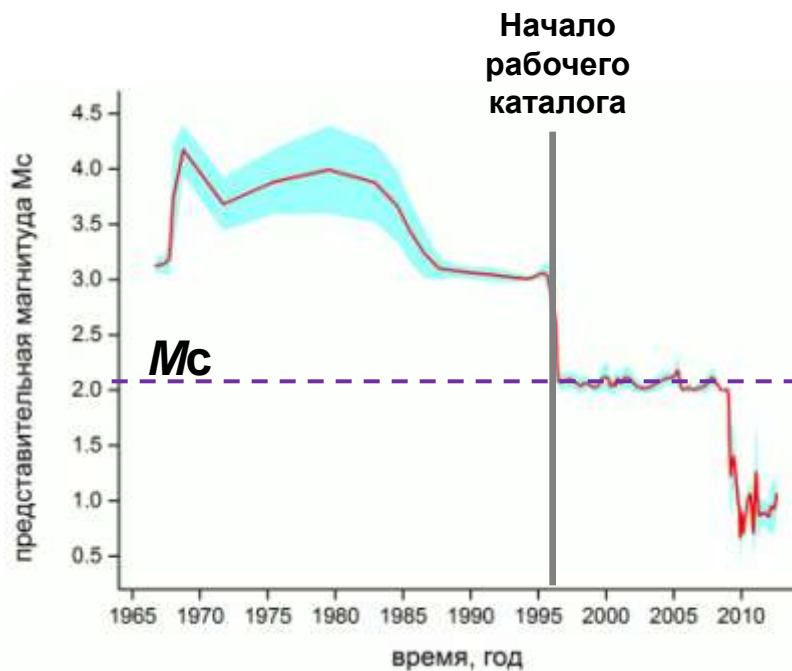
Около половины (4690 событий) всех землетрясений каталога составляют афтершоки землетрясений с $M_L \geq 4$. При всех расчетах афтершоки из каталога не исключались.

Исследование распределения зарегистрированных землетрясений по глубине показало, что **99.6%** произошло в интервале глубин $H=0-20$ км. В связи с этим этот слой и был выбран в качестве рабочего.



Средние значения погрешностей локации составляют около 1 км для эпицентров и около 3 км для гипоцентров.

Представительная магнитуда

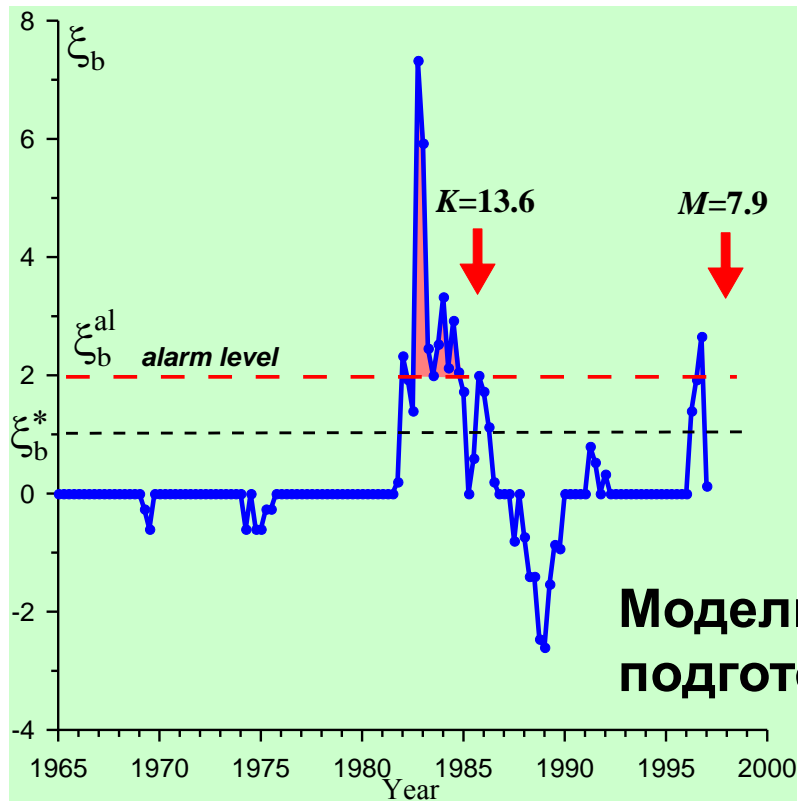


Основываясь на графике изменения представительной магнитуды, в качестве временного интервала был выбран период **1996-2012** гг., в течение которого было зарегистрировано **96.5%** всех событий каталога. В качестве представительной магнитуды была выбрана **$M_c=2.1$** и во всех последующих расчетах параметров 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.

Таким образом, в рабочий каталог, включающий представительные землетрясения с **$M_L \geq 2.1$** произошедшие в диапазоне глубин **$H=0-20$ км** в течение 1996-2012 гг., попало около **4500** событий.

Какие параметры были использованы:

► ***b-value*** (оценка максимального правдоподобия)

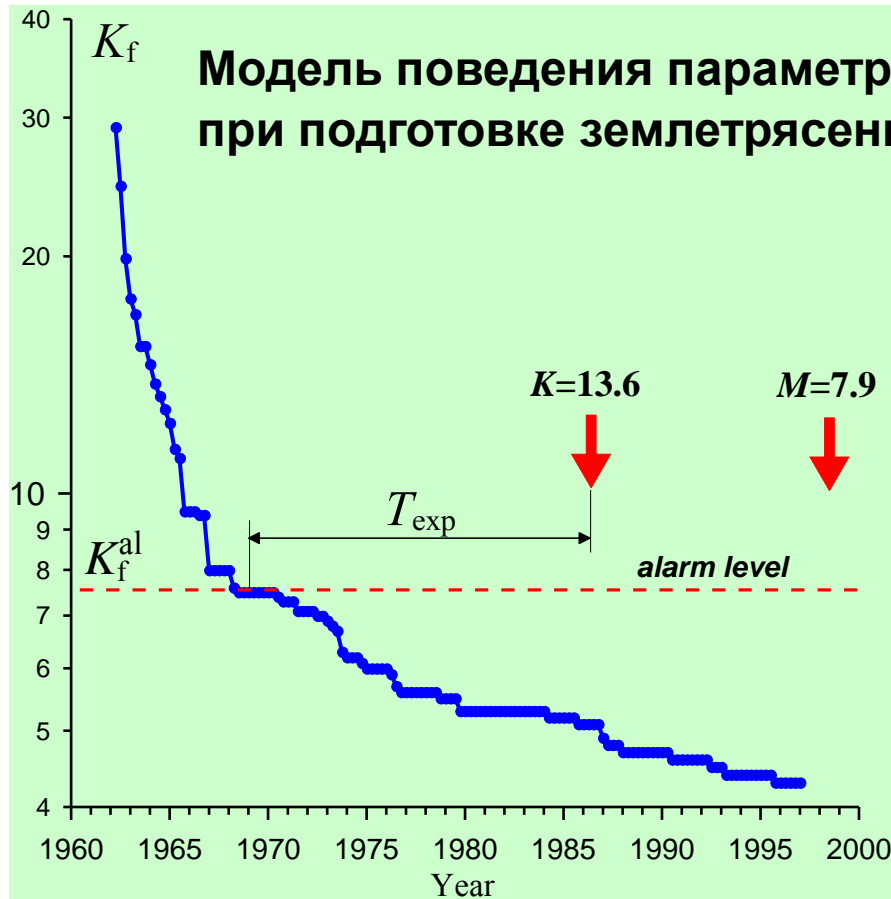


$$\hat{b} = \lg \left[1 + \frac{N_{\Sigma}}{\sum_{n=0}^{\infty} n \cdot N(K_{\min} + n \cdot \Delta K)} \right] / \Delta K$$

$$\sigma_b \approx \hat{b} / \sqrt{N_{\Sigma}}$$

▶ параметр концентрации разрывов K_f

Модель поведения параметра K_f при подготовке землетрясения



$$K_f = \mu^{-3/l_{avr}}$$

где μ – объемная плотность (концентрация) разрывов, определяемая по произошедшим землетрясениям,

$l_{avr} = 1/n \sum_{i=1}^n l_i$ – средняя длина разрывов в ячейке,

n – количество событий в ячейке.

Величина $R_{avr} = \mu^{-1/3}$ представляет среднее расстояние между центрами разрывов в ячейке.

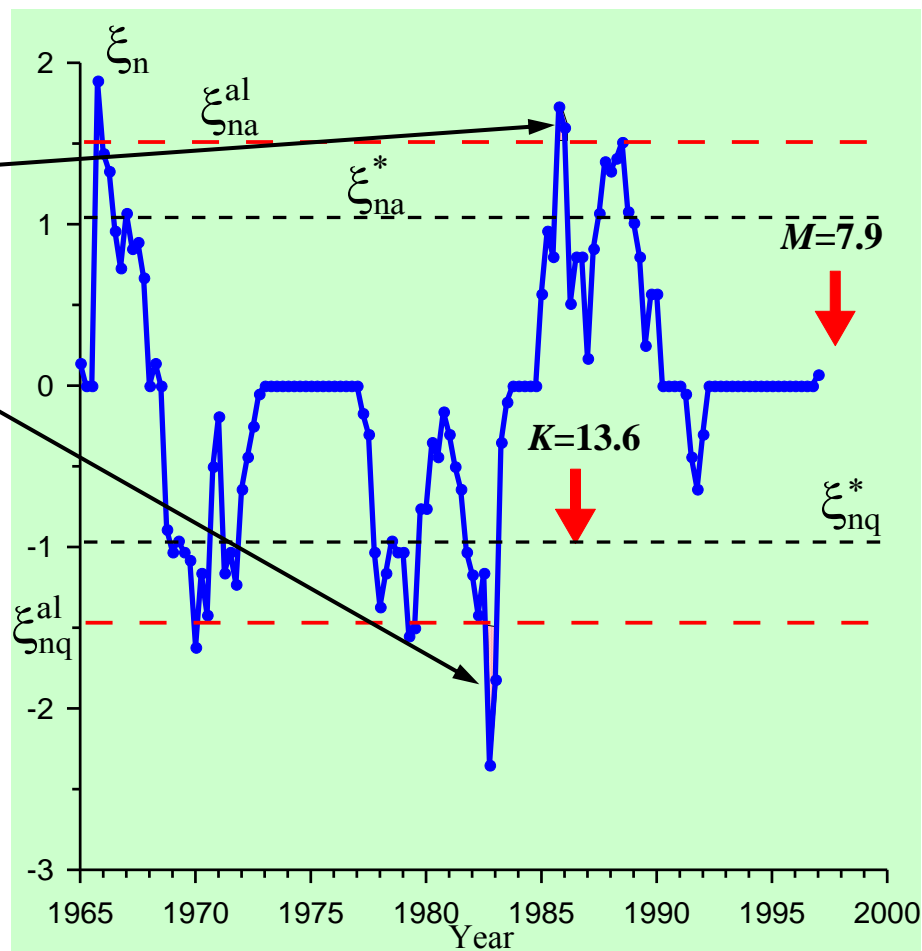


число землетрясений N

$$N = \frac{1}{T} \sum_{K_{\min}}^{K_{\max}} N(K_i)$$

$$\sigma_n = \sqrt{N}$$

- сейсмическая активизация;
- сейсмическое затишье



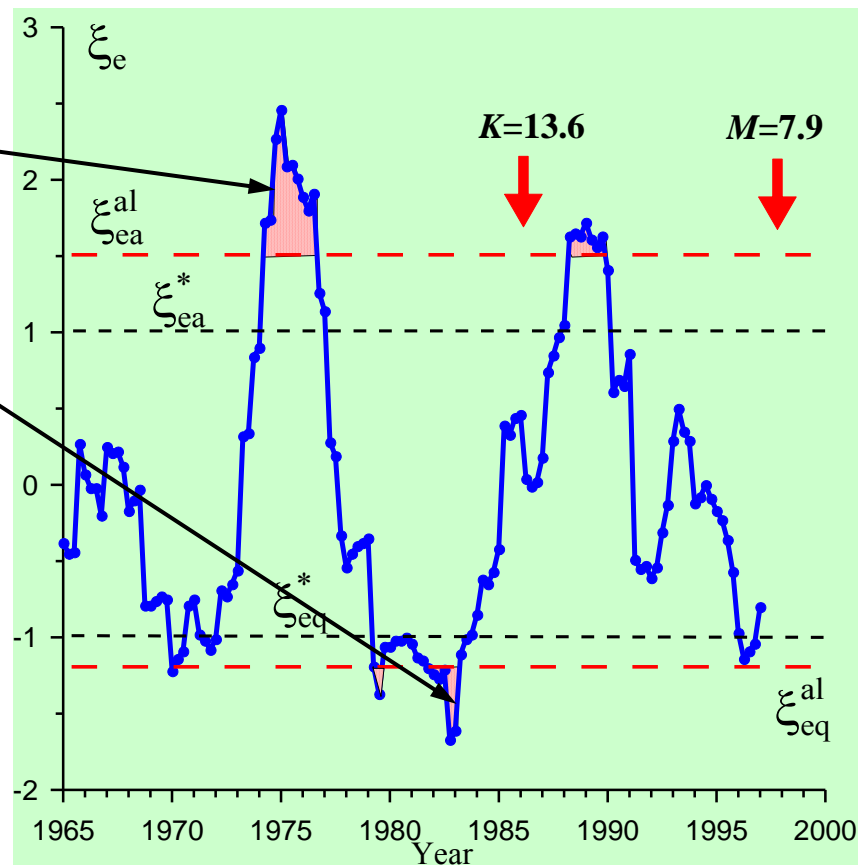
Модель поведения параметра N
при подготовке землетрясения

выделившаяся сейсмическая энергия (по слабым событиям)

$$\sum E^{2/3} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}(K < K_0)} E_i^{2/3}$$

- сейсмическая активизация;
- сейсмическое затишье

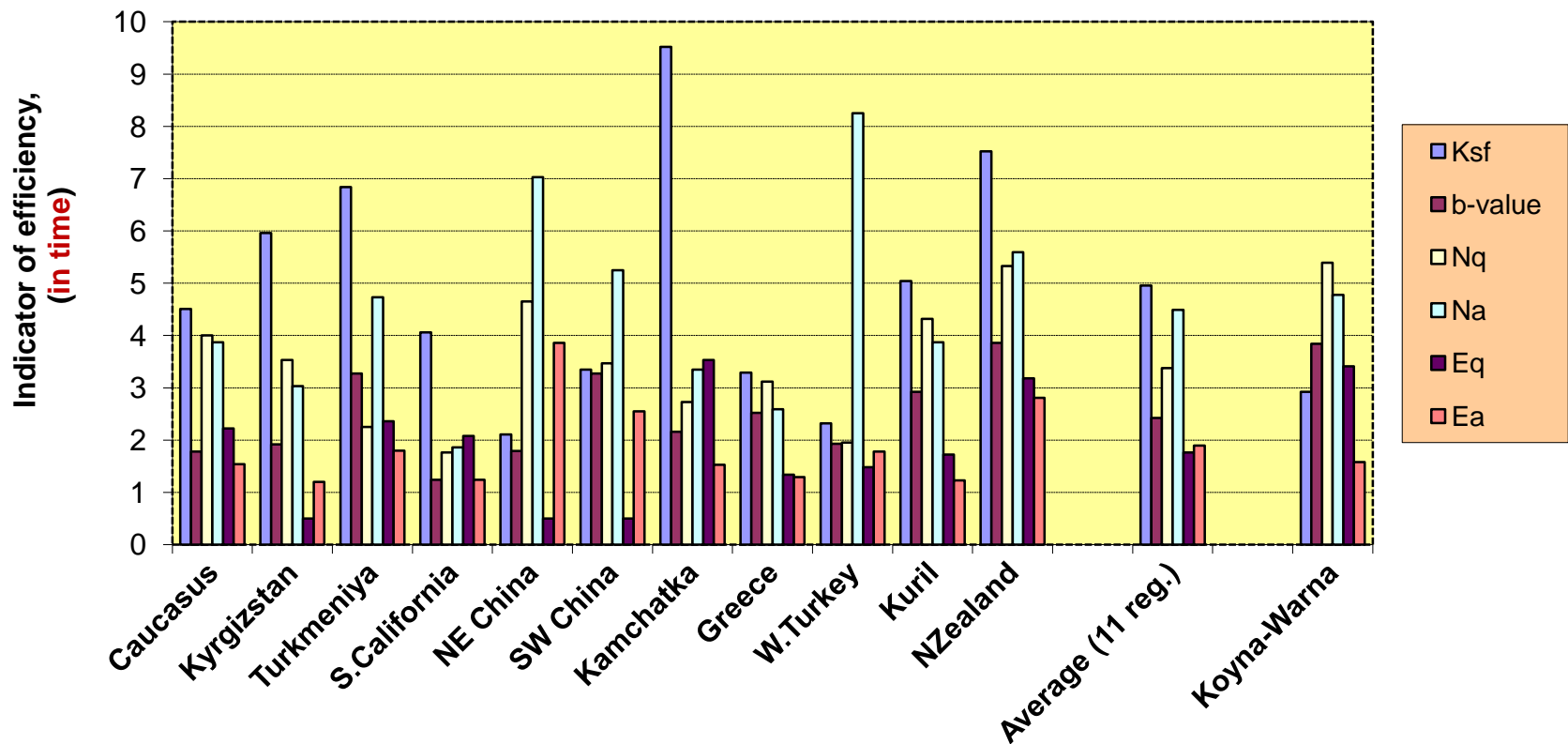
Модель поведения параметра $\sum E^{2/3}$ при подготовке землетрясения



Эффективность используемых предвестников

(во времени)

$$J_t = \frac{N_{pr} / T_{exp.total}}{N_{total} / T_{obs}}$$



Байесовский подход для расчета КОЗ

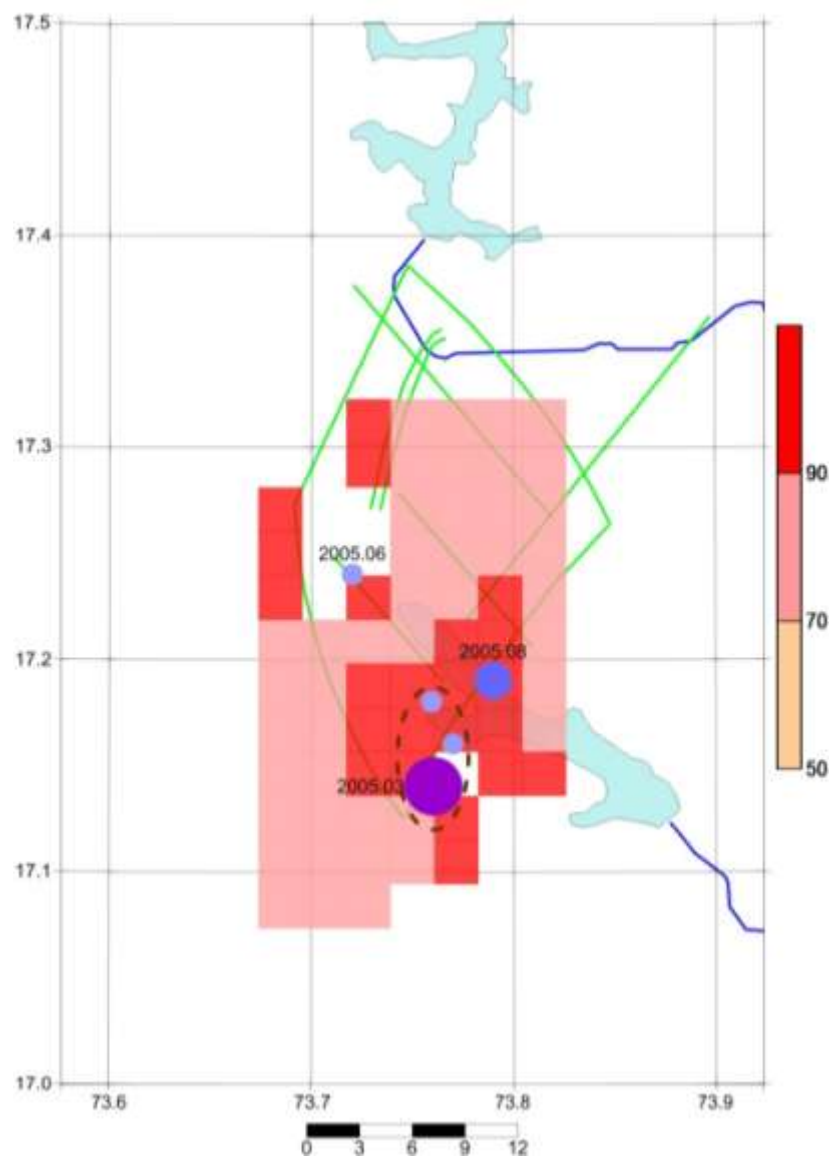
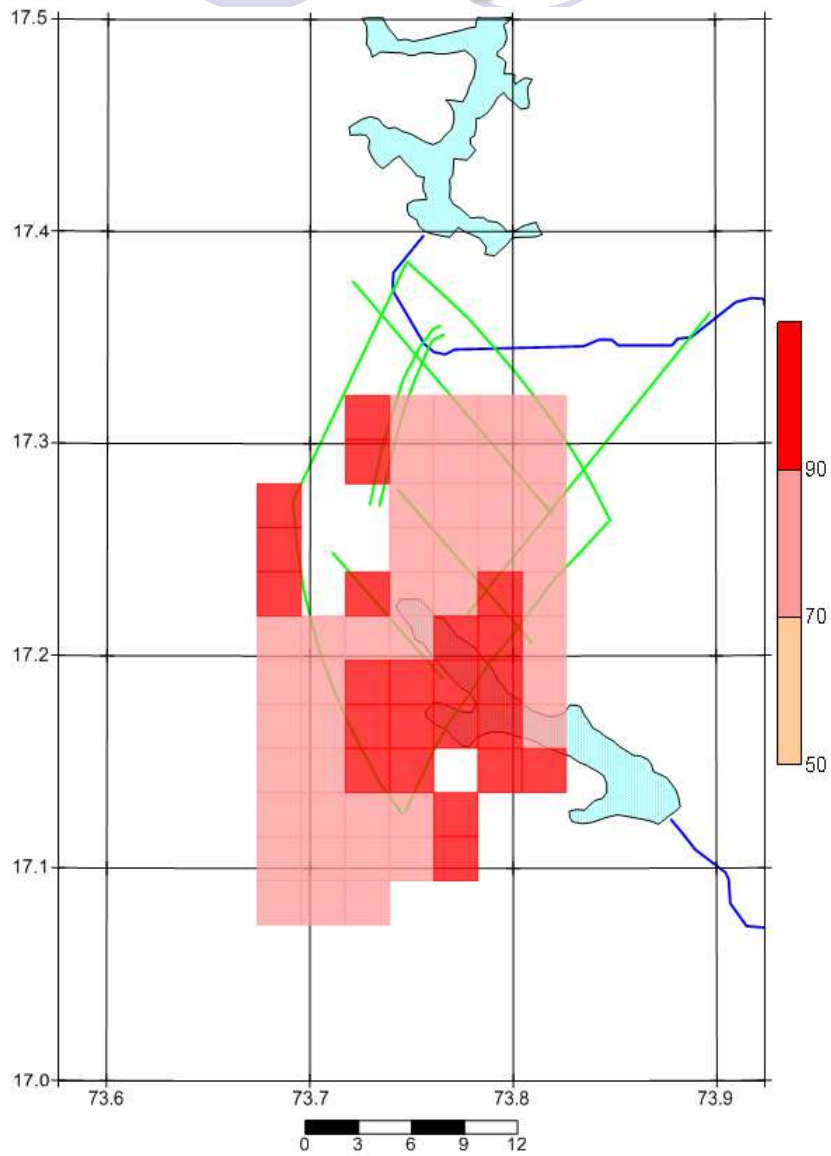
Условная вероятность возникновения сильного землетрясения в элементарной пространственной ячейке вычисляется как

$$P(D_1 | K) = \frac{P(D_1) \prod_{i=1}^n P(K_i | D_1)}{P(D_1) \prod_{i=1}^n P(K_i | D_1) + P(D_2) \prod_{i=1}^n P(K_i | D_2)}$$

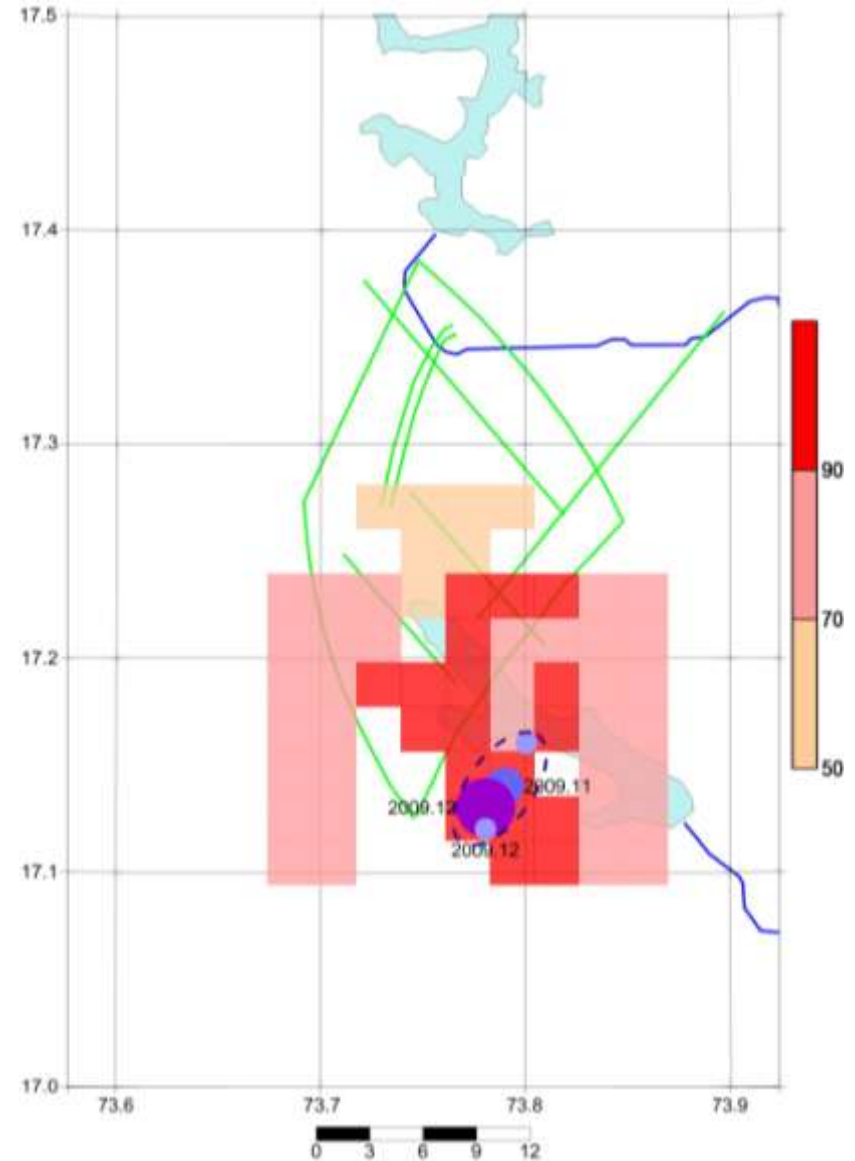
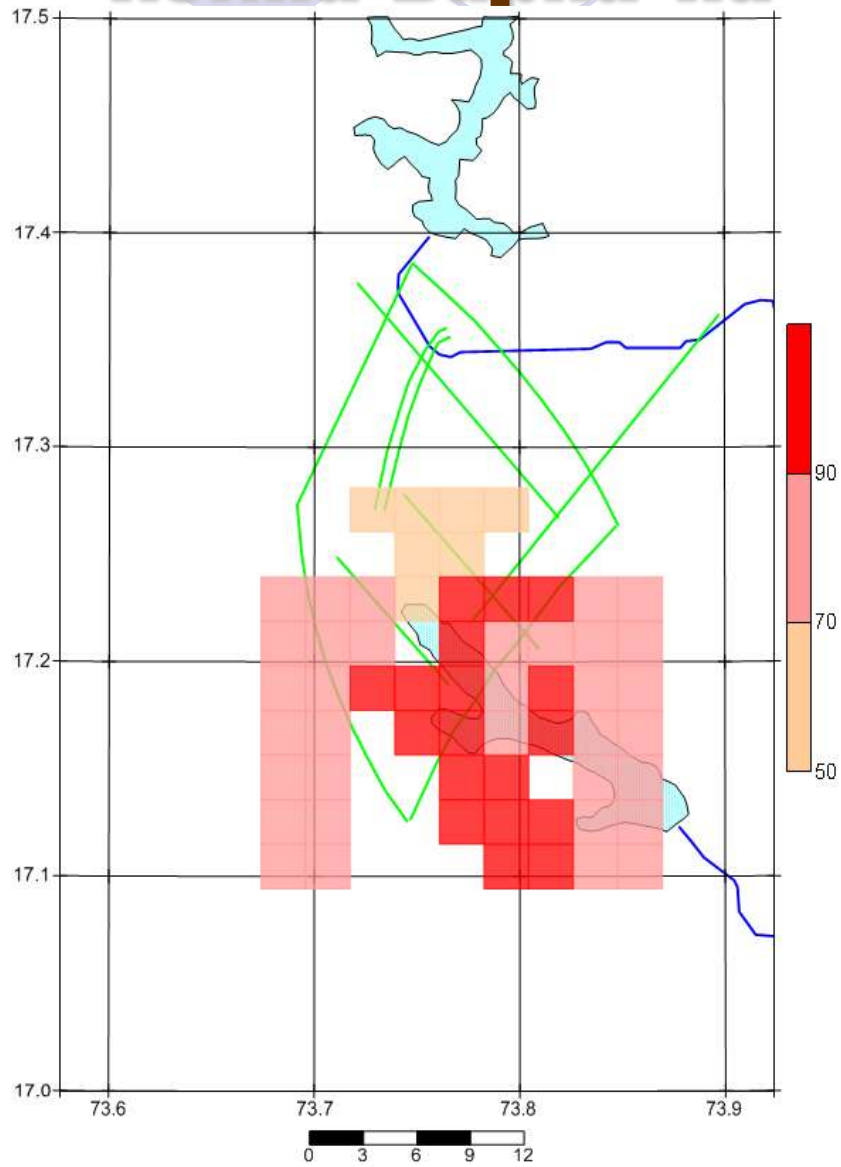
где $P(K_i | D_1)$ – условная вероятность возникновения сильного землетрясения при использовании прогнозного признака K_i ; $P(K_i | D_2)$ – условная вероятность ложной тревоги; $P(D_1)$ – безусловная вероятность возникновения сильного землетрясения в рассматриваемой пространственной ячейке; $P(D_2) = 1 - P(D_1)$ – безусловная вероятность отсутствия сильного землетрясения в рассматриваемой ячейке.

Для района **Койна-Варна** $P(D_1) = 0.1698$.

Карта ожидаемых землетрясений района Койна-Варна на 2003.10.01-2005.09.30



Карта ожидаемых землетрясений района Койна-Варна на 2009.01.01-2010.12.31

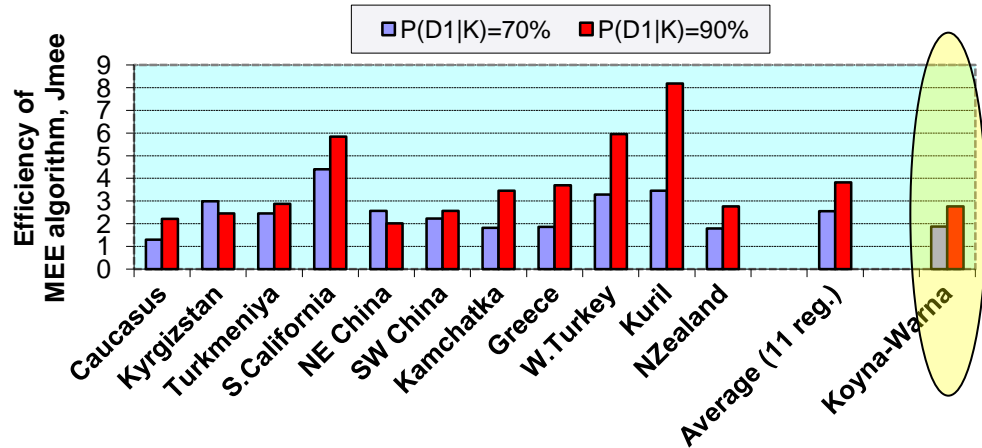


Результаты ретроспективного прогноза

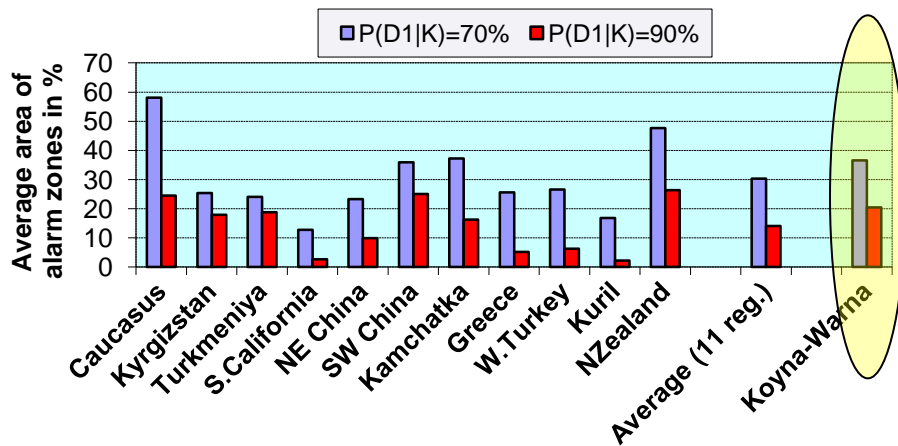
Диапазон магнитуд	Уровень условной вероятности, $P(D1 K)$		
	50 %	70 %	90%
$M \geq 5.0$	2/2	2/2	2/2
$4.5 \leq M < 5.0$	4/5	3/5	3/5
$4.0 \leq M < 4.5$	7/9	6/9	4/9
Всего:	13 (16)	11 (16)	9 (16)

Эффективность алгоритма КОЗ по регионам

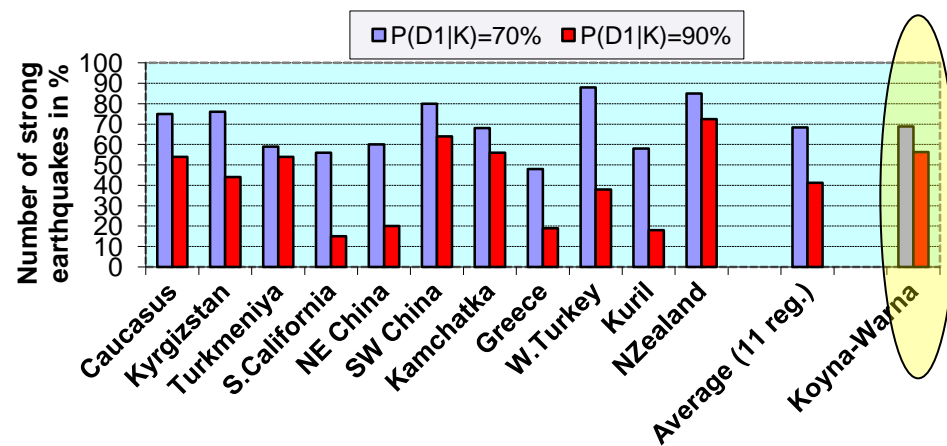
$$J_{MEE} = \frac{N_{pr} / \tilde{S}_{exp}}{N_{total} / S_{obs}}$$



Средняя площадь ожидания

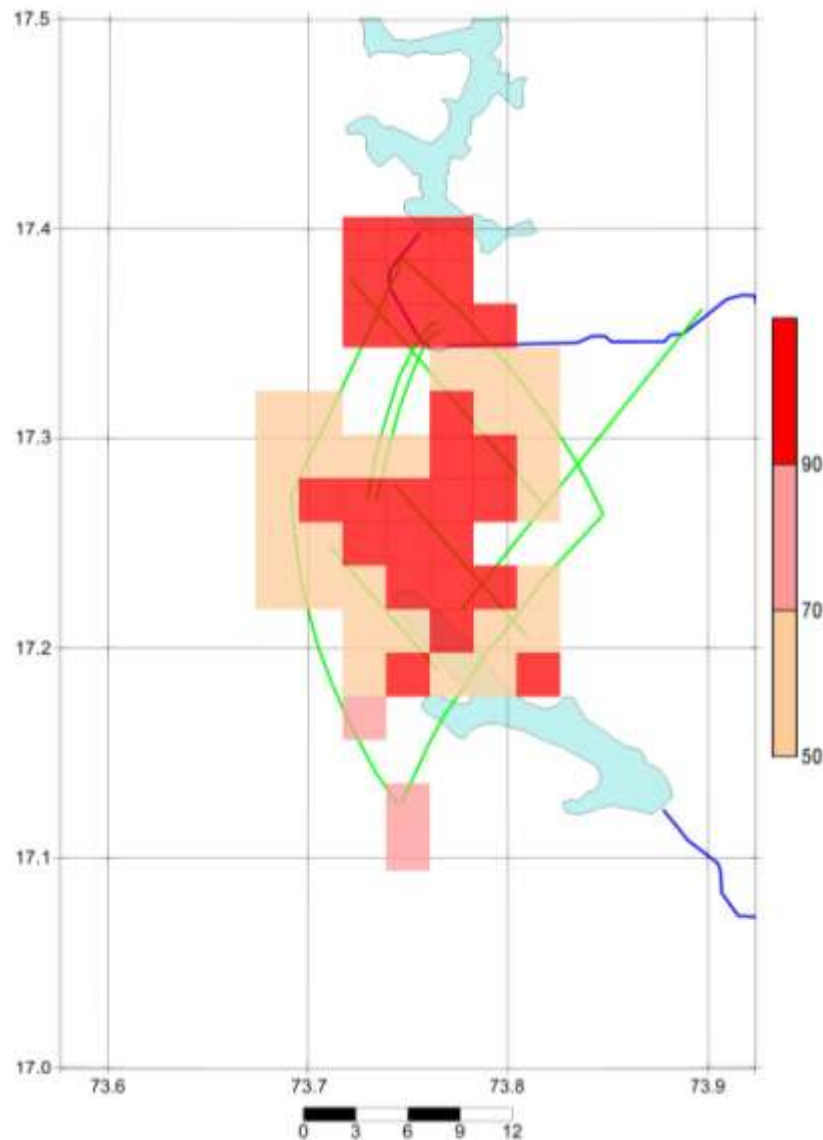


Число сильных землетрясений



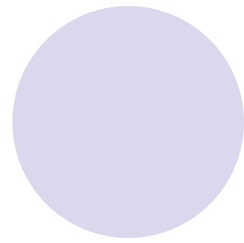
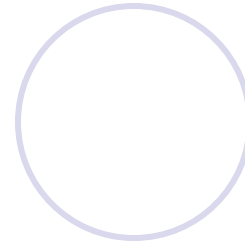
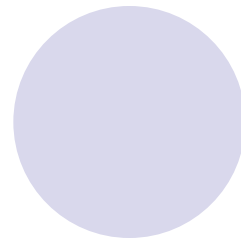
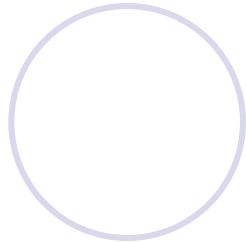
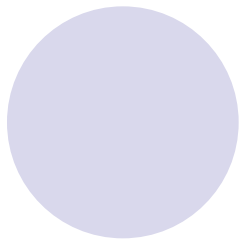
Карта ожидаемых землетрясений района Койна-Варна на 2012.10.01-2014.09.30

(объект для прогноза в реальном времени)



ВЫВОДЫ

- ➡ Полученные **впервые** результаты применения алгоритма КОЗ в классическом районе с переходным режимом сейсмичности оказались **обнадеживающими**. Они показали его достаточно высокую прогнозную эффективность, оказавшуюся равной **$J=2.76$** .
- ➡ В зонах с уровнем условной вероятности **90%** произошло **56.3%** всех землетрясений **$M_L \geq 4$** . 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.



**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**
ЗА ВНИМАНИЕ!