

К. А. Пупков, Као Динь Чонг

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ****(на примере северо-западного района Вьетнама)**

Приведены результаты исследования прогнозирования землетрясений в северо-западном районе Вьетнама с помощью нейросетевых технологий. Каталог землетрясений северо-западного района Вьетнама использован для обучения нейросети.

E-mail: pupkov@iu1.bmstu.ru

Ключевые слова: прогноз землетрясений, магнитуды землетрясений, нейронная сеть.

Прогнозирование землетрясений и их характеристик (времени, уровня мощности и района) — это главная задача сейсмологов. Некоторые сейсмологи утверждают, что проблема сейсмических исследований для прогнозирования землетрясений не реальна, потому что закон сейсмической активности очень сложен для математического описания, повторяющиеся циклы землетрясений очень велики, а период мониторинга землетрясений слишком короткий. Однако получен ряд удачных долгосрочных (более 10 лет) и среднесрочных прогнозов (от 1 до 10 лет). Эффективность прогноза землетрясений в провинции Ляонин Китая в 1975 г. является примером успешных исследований землетрясений.

Среднесрочный прогноз землетрясений во Вьетнаме сделан для северо-западного района, который считается сейсмически активным, а также имеет достаточное число станций наблюдения [1–8]. В 2002 г. Данг Тхань Хай, Нгуен Дык Винь и Као Динь Чьеу [1] использовали отношения между временем возникновения землетрясений и их магнитудам для прогноза вероятности сильного землетрясения на северо-западе. Также использовались программы M8S и CN для среднесрочного прогноза землетрясений для северо-западного района [1, 4, 8].

Сейсмические характеристики одной области (сейсмические показатели потенциала региона) определяются следующими величинами: интервальным временем T , в которое происходят n землетрясений; средней величиной мощности n землетрясений M_{mean} ; скоростью выделения энергии $dE^{1/2}$; значением b функции Гуттенберга–Рихтера; средним отклонением η функции Гуттенберга–Рихтера; разностью между значениями M_{max} наблюдения по функции Гуттенберга–Рихтера

и значениями M_{\max} в реальности ΔM ; средним временем μ сейсмического спокойствия; отношением c между отклонениям времени наблюдения и значением μ [9–11].

Теперь определим значения сейсмических характеристик:

1. Значение T : интервал времени T (частота повторения землетрясений) определяется следующей формулой:

$$T = t_n - t_1, \quad (1)$$

где t_1 — момент происхождения первого землетрясения; t_n — момент n -го землетрясения; n — число землетрясений в рассмотренном интервале времени.

2. Значение M_{mean} определяется выражением:

$$M_{mean} = \sum M_i/n, \quad (2)$$

где M_i — мощность i -го землетрясения по магнитудам, $i = \overline{1, n}$.

3. Значение $dE^{1/2}$ считается по формуле

$$dE^{1/2} = \sum E^{1/2}/T, \quad (3)$$

где

$$E = 10^{(11,8+1,5M)} \text{ergs} \quad (4)$$

— формула Рихтера.

4. Значение b определяется по уравнению Гуттенберга–Рихтера:

$$\log N = a - bM, \quad (5)$$

где N — число землетрясений, имеющих мощности по магнитудам $\geq M$;

$$a = \sum (\log N_i + bM_i)/n; \quad (6)$$

$$b = \left(n \sum M_i \log_{10} N_i - \sum M_i \sum \log_{10} N_i \right) / \left(\left(\sum M_i \right)^2 - n \sum M_i^2 \right); \quad (7)$$

N_i — число землетрясений, имеющих мощности по магнитудам $\geq M_i$.

5. Значение η определяется по функции Гуттенберга–Рихтера:

$$\eta = \sum (\log N_i - (a - bM_i))^2 / (n - 1). \quad (8)$$

6. Значение ΔM определяется как

$$\Delta M = M_{\max}(\text{наблюдения}) - M_{\max}(\text{прогноза}), \quad (9)$$

где $M_{\max}(\text{наблюдения})$ — значение максимального землетрясения по магнитудам среди n землетрясений; $M_{\max}(\text{прогноза})$ — значение максимального землетрясения в прогнозе по магнитудам и по функции Гуттенберга–Рихтера

$$M_{\max}(\text{прогноза}) = a/b. \quad (10)$$

7. Значение μ определяется по формуле

$$\mu = \sum t_i(\text{основные})/n(\text{основные}), \quad (11)$$

где $t_i(\text{основные})$ — интервал времени между двумя основными характеристическими землетрясениями, имеющими мощности по магнитудам M_i ; $n(\text{основные})$ — число основных характеристических землетрясений.

8. Значение c определяется по формуле

$$c = \text{отклонение времени наблюдения}/\mu. \quad (12)$$

Чем больше c , тем больше разность между временем в реальности и прогнозе.

Применение нейросетевых технологий для прогноза землетрясений. Первая попытка применения метода нейронной сети в задаче прогноза землетрясений была предпринята в 1994 г. [12]. Последующие результаты исследований, опубликованные в работах [9, 10, 13–15] подтвердили эффективность этого направления.

Для прогноза землетрясений использовались такие нейронные сети как ANN (Artificial Neural Network) с алгоритмом обучения обратного распространения ошибки [13, 16], RBF (Radial Basic Function) [14], NARX (Nonlinear autoregressive network with exogenous inputs) [15], RNN (Recurrent Neural Network) [9], PNN (Probabilistic Neural Network) [10]. Эти нейронные сети в зависимости от входных данных имеют два вида применения: для прогнозирования возможного максимального землетрясения [13, 15] и места и интервала времени возникновения землетрясения [9–12, 14, 16, 17].

Существуют также и другие методы прогноза землетрясения. Во Вьетнаме были применены для прогноза методы CN, M8, M8S, но недостаточные статистические данные оказывают отрицательное влияние на результаты прогноза [1, 7, 8] и по этой причине невозможно применить алгоритм среднесрочного прогноза землетрясений (КОЗ) А.Д. Завьялова.

В настоящей работе ставится задача прогноза места, времени и магнитуды землетрясения. Для ее решения оказалось эффективным применение многослойной нейронной сети с алгоритмом обратного распространения, которое требует меньшее число данных, поскольку здесь задача прогноза землетрясения решается как задача распознавания образов. Применение во Вьетнаме нейронной сети по прогнозу возможного максимального землетрясения проведенное авторами [18] и сравнение его результатов с данными, полученными другими методами, показало, что этот прогноз ошибки является более надежным.

Далее в работе решается задача прогноза землетрясения на примере северо-западного района Вьетнама.

Прогноз землетрясений для северо-западного района Вьетнама. В процедуре прогнозирования землетрясений для периода 2011–2015 гг. в северо-западном районе Вьетнама включены следующие шаги.

Определение интервала времени прогноза землетрясений. Для того чтобы получить хорошие результаты прогноза, сначала надо выбрать каталог землетрясений и минимальное значение землетрясений прогноза. Характеристика распределений землетрясений по годам и годового расположения значений землетрясений по мощности представлены на рис. 1 и 2. Из рис. 1 следует, что интервалом времени прогноза является период с 1976 до 2010 г.

Прогноз землетрясений в районе северо-западного Вьетнама в интервале времени 2011–2015 гг. Для прогноза землетрясений осуществлены следующие действия.

1. Определение интервалов времени прогноза. В интервале прогноза (1976–2010 гг.) определены 7 подынтервалов времени: 1976–1980 гг.; 1981–1985 гг.; 1986–1990 гг.; 1991–1995 гг.; 1996–2000 гг.; 2001–2005 гг. и 2006–2010 гг. Минимальное землетрясение по магнитудам в каталоге 3,5. Подынтервалы времени прогноза определяются с шагом 5 лет и предыдущий подынтервал используется для прогноза землетрясения следующего подынтервала. Входными данными являются значения T (дней); M_{mean} ; $dE^{1/2}$; b ; η ; ΔM . Эти значения вычисляются по формулам (1)–(9) и представлены в табл. 1. Значения μ и c не использовались в работе, потому что число землетрясений в северо-западном районе Вьетнама было не достаточно и эти величины не влияют на качество прогноза.

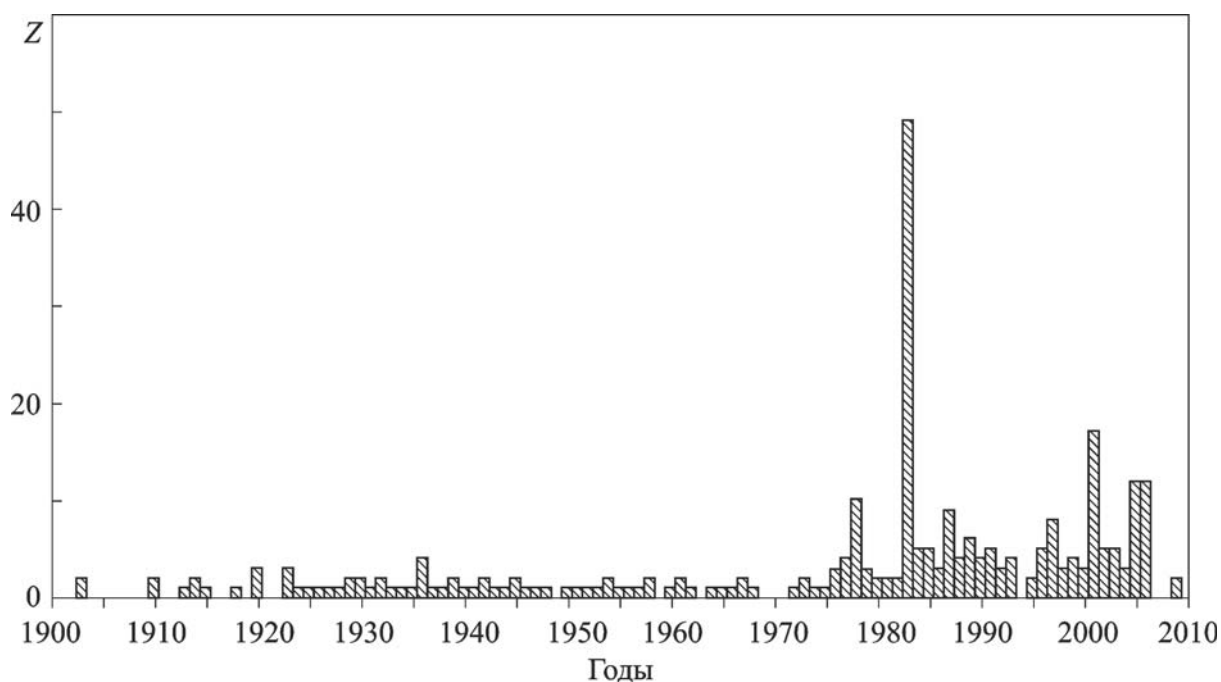


Рис. 1. Карта распределения землетрясений для северо-западного района Вьетнама по годам

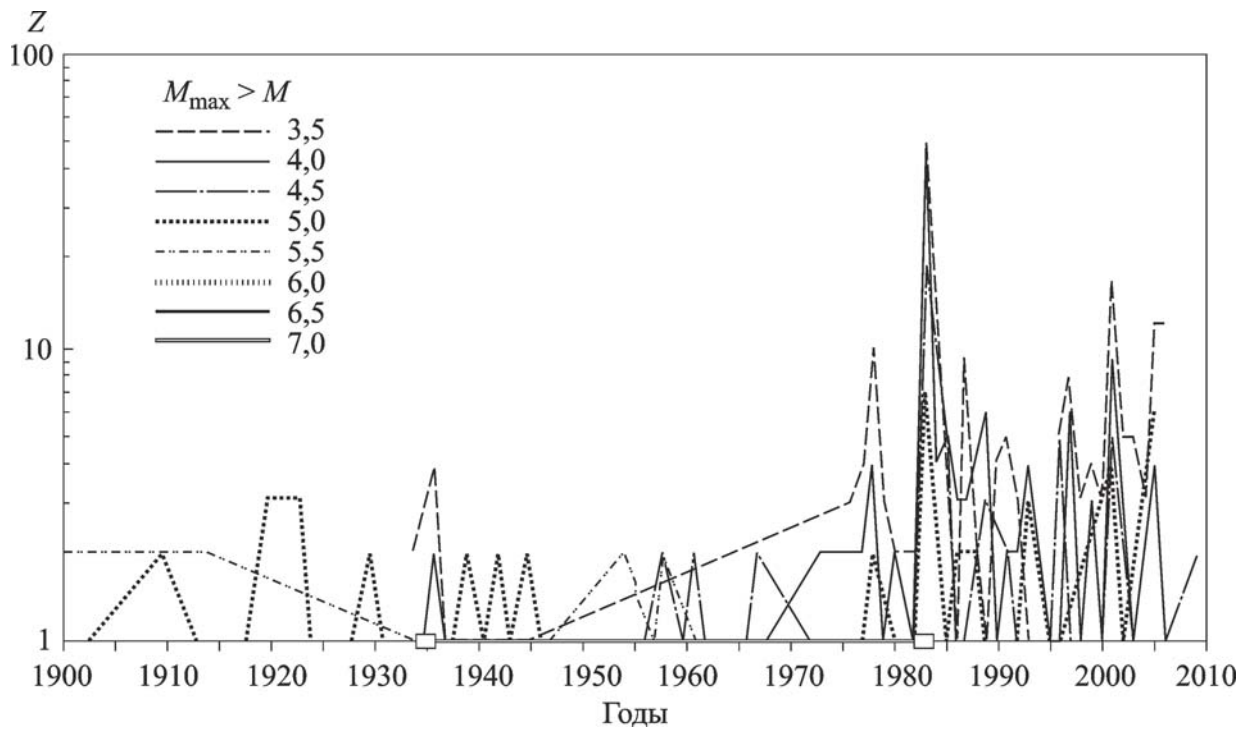


Рис. 2. Карта годового расположения значений землетрясений для северо-западного района Вьетнама по мощности

Таблица 1

Входные данные для прогноза землетрясений северо-западного Вьетнама

Подынтервалы прогноза (годы)	T	$dE^{1/2}$	b
1976.1980	1716	1.21581e+07	0.72819
1981.1985	1358	1.219722e+08	0.79910
1986.1990	1484	2.248179e+07	0.69068
1991.1995	1674	1.87813e+07	0.78829
1996.2000	1555	1.15112e+07	0.97625
2001.2005	1725	3.01123e+07	0.76267
Подынтервалы прогноза (годы)	η	M_{mean}	ΔM
1976.1980	0.00676	4.01111	0.34626
1981.1985	0.00779	3.93152	0.78071
1986.1990	0.00135	4.03929	0.74227
1991.1995	0.01469	4.16528	0.42182
1996.2000	0.00336	3.92381	0.12019
2001.2005	0.01445	4.15556	0.41732

2. *Выбор нейронной сети.* Выбор нейронной сети определяется по входным данным (см. табл. 1) на основе проб и ошибок. Выборка основана на значениях R , определяющих отношение между реальными и полученными результатами. Чем ближе значение R к 1, тем точнее результаты. Программа Matlab с модулем нейронной сети использовалась для создания сети (рис. 3). В результате получена оптимальная нейронная сеть FBP (Levenberg-Marquardt Feedforward BackPropagation Network) с тремя слоями: входной (6 нейронов), скрытый (5 нейронов) и выходной (1 нейрон) для прогноза землетрясений северо-западного района Вьетнама со значением $R = 0,72$.

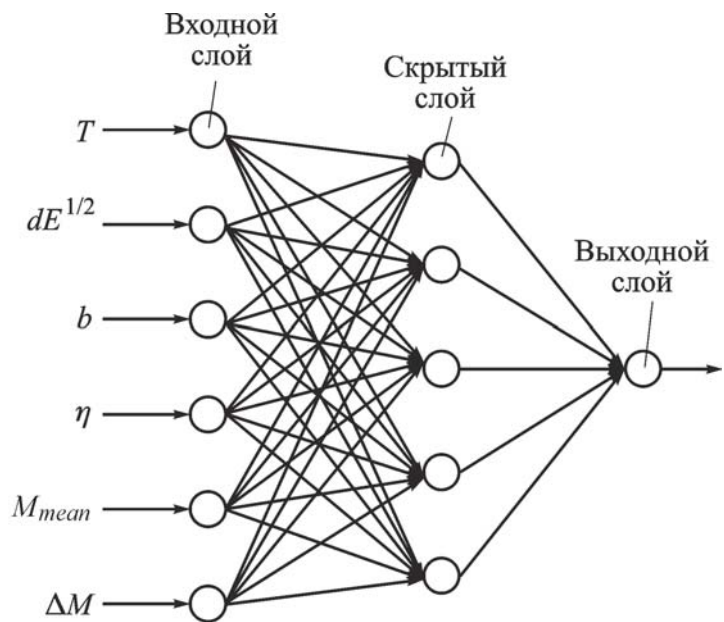


Рис. 3. Нейронная сеть для прогноза землетрясений в северо-западном районе Вьетнама

Выходным значением является мощность будущего землетрясения, активационная функция нейронов logsig . Различие между реальными и прогнозными значениями небольшое (табл. 2). Таким образом, возможность применения метода нейронной сети для прогноза землетрясений северо-западного района Вьетнама (время, место и мощность будущего землетрясения) подтверждена моделированием в Matlab с модулем нейронной сети (Neural Network Toolbox 6.0.4/nntool).

Таблица 2

Реальные значения и полученные данные прогноза с нейронной сетью FBP

Магнитуда	1981–1985 гг.	1986–1990 гг.	1991–1995 гг.	1996–2000 гг.	2001–2005 гг.	2006–2010 гг.
M (реальная)	6,6	6,4	5,1	4,7	5,0	4,8
M_{\max} (прогноз)	6,7	4,9	5,0	4,8	5,3	4,7

Таблица 3

Каталог землетрясений северо-западного района Вьетнама в интервале времени 2006–2010 гг.

Долгота	Широта	Мощность (M)	Год	Месяц	День
102.81	22.24	4.00	2006	1	6
103.01	21.99	3.90	2006	1	6
105.72	20.88	3.00	2006	2	3
103.38	21.19	3.10	2006	3	5
104.56	22.15	3.40	2006	3	16
103.48	22.13	3.10	2006	3	19
104.73	21.64	3.00	2006	3	19
103.94	21.33	3.10	2006	3	26
103.66	22.49	3.00	2006	4	13
104.27	21.29	4.30	2009	11	26
104.20	21.40	3.70	2009	12	9
104.20	21.40	4.50	2010	9	26
104.20	21.40	4.70	2010	12	31

3. Прогноз землетрясений для северо-западного района Вьетнама в интервале времени 2011–2015 гг.

Определяется каталог землетрясений северо-западного района Вьетнама в интервале времени 2006–2010 гг. (табл. 3), входные значения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Входные значения для прогноза будущего землетрясения северо-западного района Вьетнама в интервале времени 2011–2015 гг.

Интервал времени	T	$dE^{1/2}$	b	η	M_{mean}	ΔM
2006–2010 гг.	1815	6,341305e+06	0,66698	0,00348	3,57368	0,26739

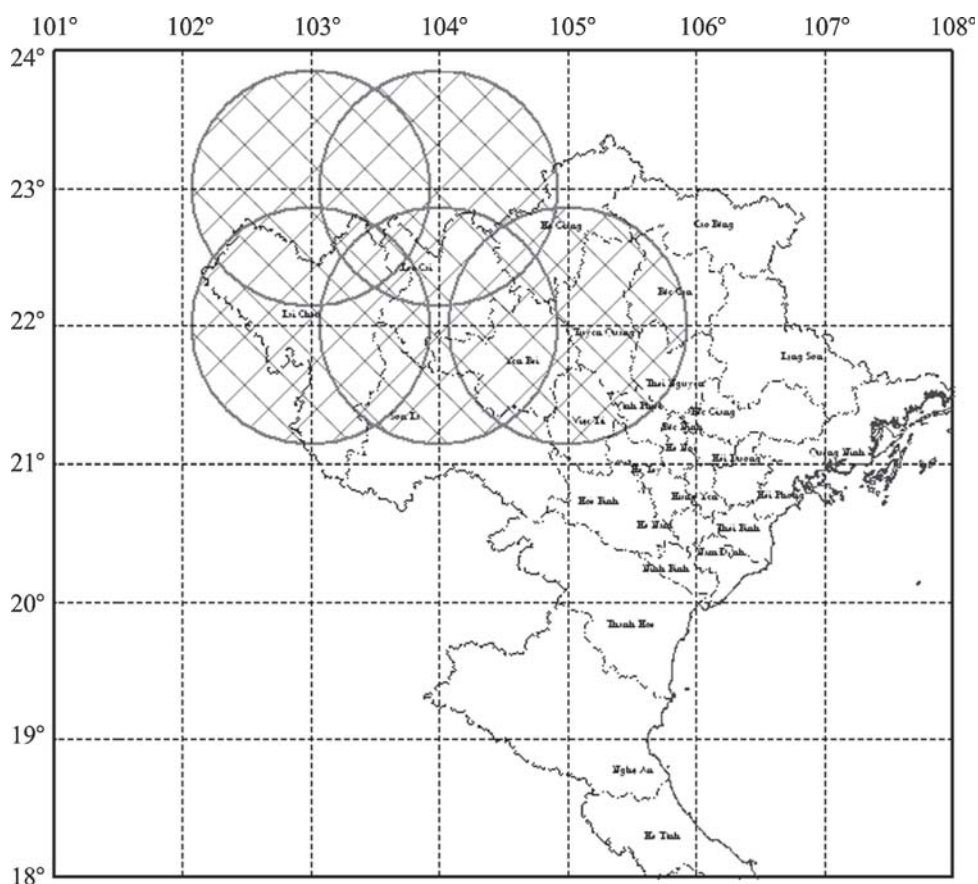


Рис. 4. Зоны вероятных землетрясений $M > 6,0$, определены методом M8 для периода 2008–2013 гг.

Полученные результаты прогноза землетрясений для северо-западного района Вьетнама на основе нейронной сети позволяют сделать следующие выводы.

1. Нейронная сеть FBP может применяться в прогнозе землетрясений северо-западного района Вьетнама. По каталогу землетрясений северо-западного района Вьетнама для интервала времени 1976–1980 гг. определено землетрясение Туан Зао 1983 г. с ошибкой 0,1 по магнитудам (значение прогноза — 6,6, реальное значение — 6,7; 6,6/6,7). Аналогично получены хорошие результаты для интервала

1991–1995 гг. (5,1/5,0); 1996–2000 гг. (4,7/4,8); 2001–2005 гг. (5,0/5,3), и 2006–2010 гг. (4,8/4,7). Результат, полученный для интервала времени 1986–1990 гг. расходится с реальностью (6,4/4,9) и это объясняется большим числом афтершоков землетрясения Туан Зао 1983 г.

2. Максимальное прогнозируемое значение землетрясения северо-западного района Вьетнама, равно 6,7 по магнитудам для интервала времени 2011–2015 гг., получено для нейронной сети ФВР. Это значение совпадает с результатом применения алгоритма М8 (рис. 4), определяющего прогнозируемое значение землетрясения для района больше 6,0 [8].

Таким образом, подтверждена высокая вероятность будущего землетрясения в этом районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao Dinh Trieu, 2010. Tai bien Dong dat o Viet Nam. Nha xuất ban Khoa hoc Ky thuat, Ha Noi, 304 trang.
2. Cao Dinh Trieu, Nguyen Dinh Xuyen, Nguyen Hong Phuong, Nguyen Thanh Tung. Seismic hazard of tay bac – Vietnam territory // Publish house Science and Technology. – Hanoi, 2006. – 216 p.
3. Cao Dinh Trieu, Nguyen Thanh Xuan. Using remote sensing data and GIS to assess seismic hazard in Tay Bac Vietnam // Conference on GIS application on manerging environment in Vietnam. – Hanoi, 1999. – P. 192–204.
4. Cao Dinh Trieu, Le Van Dung, Thai Anh Tuan. About the terrain correction method for gravimeter survey in Vietnam // Journal of Science and Technology. – 2006. – Vol. 44, no. 2. – P. 106–113.
5. Cao Dinh Trieu, Panza G. F., Cao Dinh Trong, Pham Nam Hung. Intermediate-term earthquake prediction in Vietnam // Journal of Geology. Series A. – 2009. – No. 314 (9–10). – P. 47–55.
6. Dang Thanh Hai, Nguyen Duc Vinh, Cao Dinh Trieu. Long-term Earthquake prediction in Lai Chau–Dien Bien region on the basis of time Magnitude model // Journal of science and technology. – 2002. – Vol. 40, no. 4. – P. 45–53.
7. Cao Dinh Trieu, Panza G. F., Peresan A., Vaccari F., Romaneli F., Nguyen Huu Tuyen, Pham Nam Hung, Le Van Dung, Mai Xuan Bach, Thai Anh Tuan, Cao Dinh Trong. Some new outcomes of the intermediate term earthquake prediction in Vietnam // Journal of Geology, 2008, Series B, No. 31–32. – P. 231–240.
8. Cao Dinh Trieu. Seismic hazards in Vietnam. Science and Technics Publishing House. Hanoi, 2010. – P. 182.
9. Ashif Panakkat and Hojjat Adeli. Neural Network model for earthquake magnitude prediction using multiple seismicity indicator // International Journal System. – 2007. – Vol. 17, no. 1. – P. 13–33.
10. Hojjat Adeli, Ashif Panakkat. A probabilistic neural network for earthquake magnitude prediction // Neural Network. – 2009. – Vol. 22. – P. 1018–1024.
11. Ma L., Zhu L. and Shi Y. Attempts at using seismicity indicators for the prediction of large arthquakes by genetic algorithm-neural network method // Asia-Pacific Economic Cooperation for Earthquake Simulation. – 1999. January 31 . – February 5., Brisbane, Australia.

12. Alves E. Ivo. Earthquake forecasting using neural networks: Results and future work // *Nonlinear Dynamics*. – 2006. – Vol. 44. – P. 341–349.
13. K ü l a h c i F., et al. Artificial Neural Network model for earthquake prediction with radon monitoring // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2009. – Vol. 67. – P. 212–219.
14. Wang Ying, Chen Yi, Zhang Jinkui. The application of RBF neural network in earthquake prediction // *Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, 2009. – P. 465–468.
15. Amir Abolfazl Suratgar, Farbod Setoudeh, Amir Hossein Salemi, Ali Negarestani. Magnitude of earthquake prediction using neural network // *08 Proceedings of the 2008 Fourth International Conference on Natural Computation*. – Vol. 02.
16. Maria Moustra, Marios Avraamides, Chris Christodoulou. Artificial neural network for earthquake prediction using time series magnitude data or seismic electric signals // *Expert Syst. Appl.* – 2011. – Vol. 38(12). – P. 15032–15039.
17. Qiuwen Zhang, Cheng Wang. Using genetic algorithm to optimize artificial neural network: A case study on earthquake Prediction // *Genetic and Evolutionary Computing*, 2008. WGEN '08. Second International Conference.
18. Пупков К. А., Као Динь Чонг, Као Динь Чьеу, Фам Нам Хунг. Прогноз возможно максимальных землетрясений в северо-западном районе Вьетнама // *Вестник РУДН*. – 2011. – № 3.

Статья поступила в редакцию 3.11.2011

Константин Александрович Пупков родился в 1930 г. Окончил в 1954 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 монографий, учебников и учебных пособий в области теории управления и интеллектуальных систем.

Pupkov K.A. was born in 1930 in Moscow. He graduated in 1954 from the Bauman Moscow Higher Technical University, Ph.D. (1958), D.Sc. (1966), Professor (1969). Head of Department “Automatic Control Systems” of the Bauman Moscow Higher Technical University. Author of more than 30 monographs and teaching aids in control theory and intelligent systems.



Као Динь Чонг родился в 1984 г., окончил в 2009 г. магистратуру РУДН. Аспирант кафедры “Кибернетики и мехатроники” РУДН. Автор 5 научных работ в области прикладной математики (землетрясения и их прогнозы).

Cao Dinh Trong (b. 1984) graduated from the Friendship’s university of Russia in 2009. Post-graduate of “Cybernetics and Mechatronics” department of the Friendship’s university of Russia. Author of 5 publications in the field of “Earthquakes and their predictions”.