

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \approx 0,3 \text{ Ф.}$$

Для оценки индуктивности силовых трубок используем выражение, полученное в работе [Ландау, Лифшиц, 1982] для индуктивности тонкого кольца из провода

$$L = 4\pi b \left(\ln \frac{8b}{a} - \frac{7}{4} \right)$$

где b - радиус кольца и a - радиус провода. В качестве радиуса силовой трубки a , как эквивалентного провода примем ларморовский радиус, который по данным [Хесс, 1972] составляет $5 \cdot 10^2 - 7 \cdot 10^3$ см. Расчёты с использованием приведённого выражения показывают, что величина индуктивности, полученной, исходя из параметров колебательного процесса, может быть реализована в силовых трубках внешнего радиационного пояса.

Наблюдения за естественными шумами в электрической сети Камчатки позволили обнаружить аномальные возмущения в диапазоне частот 2-19 кГц. В структуре возмущений присутствует колебательный процесс с частотой $\approx 38 \cdot 10^{-3}$ Гц, обусловленный, вероятнее всего, вариациями токовой структуры электроджета. Сезонная зависимость времени регистрации возмущений служит дополнительным подтверждением этого предположения. Колебательные процессы вероятнее всего происходят в ионосферно-магнитосферном контуре, образованном индуктивностью силовых трубок магнитного поля Земли и емкостью электроджет-Земля.

Литература

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, М. Наука, 1982.–620 с.
 Мальцев Ю.П., Леонтьев С.В., Ляцкий В.Б. Индукционные электрические поля во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия. 1975. Том 15, №3. – С.519-523.
 Семенов Н.А. Техническая электродинамика. – М.:Связь,1973. – 480 с.
 Трахтенгерц В.Ю., Тагиров В.Р., Черноус С.А. Проточный циклотронный мазер и импульсные ОНЧ-излучения // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Том 26, №1.– С.99–106 с.
 Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера– М.:Атомиздат, 1972. – 352 с.
 Boteler D.H., R. Pirjola, L. Trichtchenko On calculating the electric and magnetic fields produced in technological systems at the Earth's surface by a «wide» electrojet // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. V. 62. P. 1311-1315.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ НА КАМЧАТКЕ USING INFORMATION SYSTEM WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO DETECT ANOMALIES GEOACOUSTIC EMISSION PRIOR TO STRONG EARTHQUAKES IN КАМЧАТКА

Ю.В.Марапулец, А.В.Шадрин

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Since 1999, Kamchatka is conducting research of high-frequency geoacoustic emission in the frequency range 0.1 Hz ... 10 kHz sonar sensors installed in small reservoirs. The results showed that during the observation period, the majority of seismic events with energy class $K_s > 11$, located generally within a radius of 250 km have been recorded acoustic anomalies recorded in the daily time interval before the earthquake. The effectiveness of the acoustic response depends on the energy of the earthquake, its removal, depth and spatial location. Analysis of the recorded data is laborious, but anomalies of geoacoustic emission before earthquakes, the sensors record the signals caused by meteorological and anthropogenic factors. Examining the characteristics of the emission signals of different nature, was built information system using

Kohonen neural network. It allowed to identify and project the anomalies geoacoustic emission of neural map, and divide them into clusters of different nature.

Землетрясения – это одни из наиболее страшных природных катастроф, уносящие десятки и сотни тысяч человеческих жизней и вызывающие разрушения на огромных пространствах. И хотя землетрясение возникает внезапно, в настоящее время научно доказанным является факт, что необходимо некоторое конечное время для накопления энергии разрывов пород в его очаге [1, 2]. Таким образом, появляется возможность оперативно предупреждать о готовящемся сейсмическом событии.

Одним из перспективных направлений исследований с целью выявления аномалий, предшествующих землетрясениям, является регистрация и анализ возмущений геоакустической эмиссии. Данное явление обусловлено деформационными процессами, распространяющимися из очагов будущих землетрясений, которые приводят к образованию зон поверхностной дилатансии [3, 4]. Анализ подобных зон показывает, что в них до процесса лавинообразного разрушения породы (землетрясения), образуются трещины и микроподвижки, которые могут являться источниками геоакустических сигналов.

Исследования геоакустической эмиссии производятся гидрофонами, ориентированными по сторонам света и установленными в небольших водоемах на Камчатке [5, 6]. Диапазон исследуемых частот от 0.1 Гц до 10 кГц (используются частотные поддиапазоны 0.1–10 Гц, 10–50 Гц, 50–200 Гц, 200–700 Гц, 700–1500 Гц, 1500–6000 Гц, 6000–10000 Гц.). Далее сигналы накапливаются за 4 секунды и записываются на жесткий диск ЭВМ. Анализ данных показал, что в период 2001 – 2004 г.г. из 74 землетрясений с магнитудой $M > 4$, произошедших на эпицентральной расстоянии до 250 км от пунктов наблюдений, 34 предварялись в суточном временном интервале сильным увеличением уровня геоакустической эмиссии в килогерцовом диапазоне [5, 6]. Установлено, что амплитуда возмущений эмиссии зависит от магнитуды землетрясения и местоположения его эпицентра. Кроме возмущений геоакустической природы, системы регистрируют сигналы, обусловленные плохой погодой, в первую очередь действием осадков и сильного ветра. Частотный диапазон таких воздействий также составляет сотни герц - единицы килогерц и близок к диапазону возмущений перед землетрясениями. В связи с этим, для детального исследования поведения геоакустической эмиссии перед сейсмическими событиями, а также ее выявления на фоне погодных аномалий возникла необходимость в информационной системе распознавания геоакустических возмущений.

Анализ данных показал, что сигнал каждого частотного поддиапазона можно представить в виде элементарных воздействий длительностью 80 сек (20 накопленных за 4 с отсчетов) [7]. Поддиапазоны 0.1–10 и 10–50 Гц исключены из дальнейшей обработки для задач распознавания, т.к. предназначены для наблюдения за сейсмическим и высокочастотным сейсмическим шумом и не используются при анализе высокочастотных возмущений геоакустической эмиссии. Таким образом, на вход информационной системы должен подаваться составной сигнал, состоящий из пяти элементарных длительностью 80 секунд.

Исследование сигналов, регистрируемых датчиками, показало, что их можно разделить на следующие группы: возмущения перед сейсмическими событиями; аномалии, вызванные дождем, ветром и другими природными или техногенными источниками; спокойное (фоновое) состояние.

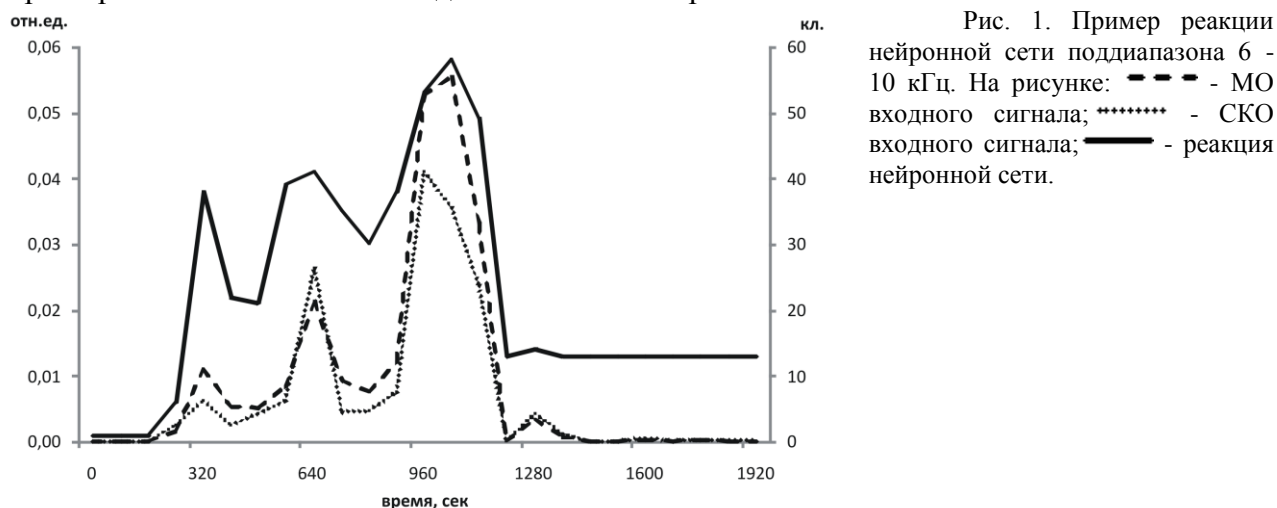
Как указано ранее, на вход информационной системы будет подаваться пять сигналов длительностью 20 отсчетов. При распознавании необходимо в каждом из сигналов обнаруживать наличие или отсутствие возмущений и в зависимости от значений среднеквадратического отклонения (СКО) и математического ожидания (МО) назначать им различные группы. Таким образом, поставленная задача сводится к классификации и кластеризации образов. Одним из популярных и распространенных инструментов,

способных ее решить, являются нейронные сети. Наиболее подходящая архитектура нейронной сети, обладающая способностью классификации и кластеризации без учителя - карты Кохонена [9]. Именно на нее и пал выбор при создании информационной системы [7].

Разобьем задачу распознавания на несколько этапов (уровней). На первом построим для каждого из пяти сигналов, подаваемых на вход системы, карту Кохонена, которая сможет разбить входные воздействия на определенные классы [7, 10]. Обучим сеть таким образом, чтобы во время изменения МО и СКО сигнала происходила смена и ее классов. В результате, на выходе первого уровня получим набор классов для каждого из пяти частотных поддиапазонов. В зависимости от характера исходного сигнала (возмущение перед землетрясением, ветер, дождь и т.п.), набор классов будет меняться. На втором уровне необходимо сконструировать новую сеть, которая будет способна анализировать значения классов с нейронных сетей поддиапазонов и принимать итоговое решение о характере исходного сигнала.

Перед синтезом нейронных сетей первого уровня необходимо подготовить обучающие выборки по 5-ти поддиапазнам, которые должны содержать эталонные сигналы возмущений. После обучения на них сеть будет определять подобные возмущения в сигнале, и соотносить их к определенному классу. Анализ элементарных возмущений показывает, что их значительное разнообразие (двенадцать основных форм, которые чередуются в различном порядке в том или ином поддиапазоне) создает определенные сложности для формирования эталонной обучающей выборки. В этом случае целесообразнее использовать генератор сигналов, способный создавать для обучения нейронных сетей воздействия с характеристиками, аналогичными «реальным».

Для реализации первого уровня системы распознавания была использована двумерная карта Кохонена размерностью $[4 \times 15]$, которая позволяет разделить входной сигнал на 60 классов. Эта размерность была получена с использованием критерия, позволяющего оценить качество кластеризации обученной сети, благодаря свойству кластеризации многомерных данных карты получили широкую популярность. Этот критерий (ККВ), имеет значение количества кластеров, в которые попадает обучающая выборка при разбиении карты на максимально возможное число кластеров. Используя этот параметр, получаем сеть, способную наилучшим образом выявлять внутренние характеристики сигналов и объединять их в кластеры.



После обучения нейронные сети, созданные на каждый поддиапазон, успешно разделили сигналы на классы. Для примера на рис. 1 показаны МО, СКО входного сигнала с геоакустическим возмущением для частотного поддиапазона 6–10 кГц и соответствующие классы нейронной сети после распознавания. На рисунке на левой шкале показаны значения МО и СКО сигналов, на правой шкале - значения классов нейронной сети.

Анализ данных показал, что на каждый из основных видов сигналов, регистрируемых системой, нейронная сеть первого уровня вырабатывает принципиально разные классы решений, что позволяет выделять возмущения различных типов.

На втором уровне системы распознавания необходимо производить анализ выработанных решений первичными нейронными сетями каждого поддиапазона и давать итоговый ответ о наличии того или иного типа возмущения. Для этого реализована карта Кохонена с размерностью $[12 \times 14]$, имеющая пять входов, для получения оптимальной архитектуры, использовалась методика максимализации ККВ. На рис. 2 слева изображена унифицированная матрица расстояний этой сети после обучения, отражающая близость нейронов между собой (чем темнее цвет, тем больше расстояние между нейронами) [11]. Справа контурами показаны кластеры, из которых состоит карта.

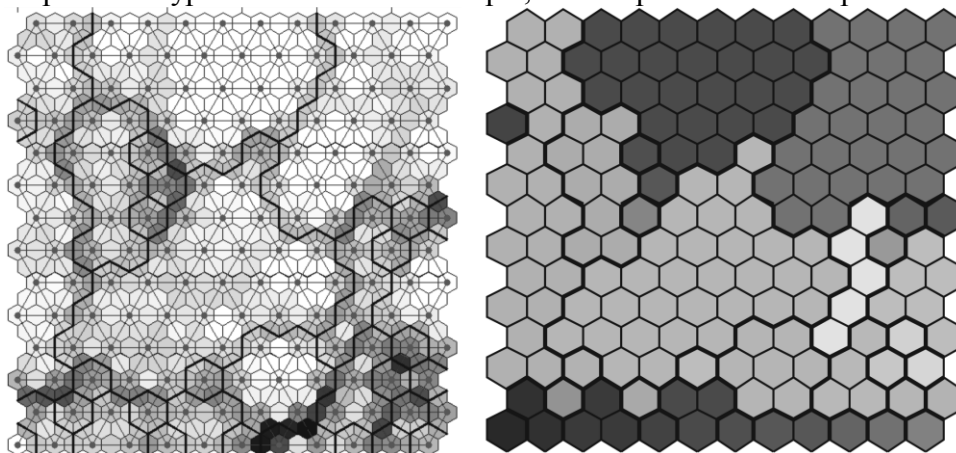


Рис. 2. Карта Кохонена с нанесением кластеров. Точками в центре шестиугольников на левом рисунке изображены нейроны сети.

С учетом вышесказанного, модель M системы можно представить следующим выражением:

$$M = \operatorname{argmin}(d(W^2(\omega_{ij})_{168 \times 5}, Y(y_{ij})_{5 \times 1})), \quad y_i = \operatorname{argmin}(d(W_i^1(w_{kj})_{60 \times 20}, X^i(x_{kj})_{20 \times 1}))$$

где W^2 - матрица весовых коэффициентов нейронной сети второго уровня; Y_i - ответ нейронной сети первого уровня каждого поддиапазона; W_i^1 - матрица весовых коэффициентов нейронной сети первого уровня каждого поддиапазона; X^i - нормализованная матрица элементарного сигнала каждого поддиапазона; $d(X, Y)$ - функция, вычисляющая евклидово расстояние между двумя многомерными матрицами; argmin - функция, вычисляющая минимальный элемент в одномерной матрице.

Для оценки качества обучения нейронных сетей в разработанной информационной системе воспользуемся методиками, предложенными в [12-14]. Это качественная (средняя ошибка квантования) и количественная (топографическая ошибка) оценки. Качественная показывает способность нейронной сети раскрывать скрытую структуру и кластеризовать данные. Данная оценка может быть применена как мера разрешающей способности карты. Количественная оценка позволяет определить непрерывность отображения входных векторов на пространстве карты. Она измеряет пропорцию всех векторов данных, для которых первый и второй нейроны победители - несмежные. Чем меньше эта ошибка, тем лучше карта сохраняет топологию. Из [13, 14] следует, что нейронную сеть можно считать «качественно» обученной, если ошибка квантования не превышает 0.4, а ошибка топологии - 0.1. Карты Кохонена на первом и втором уровне информационной системы были обучены с учетом соответствия этим требованиям.

На рис. 3 показан пример работы информационной системы распознавания геоакустических возмущений. На ее вход подается сигнал, состоящий из аномалий вызванных дождем (участок 1 на рис. 3), ветром (участок 2) и возмущение эмиссии перед землетрясением (участок 3).

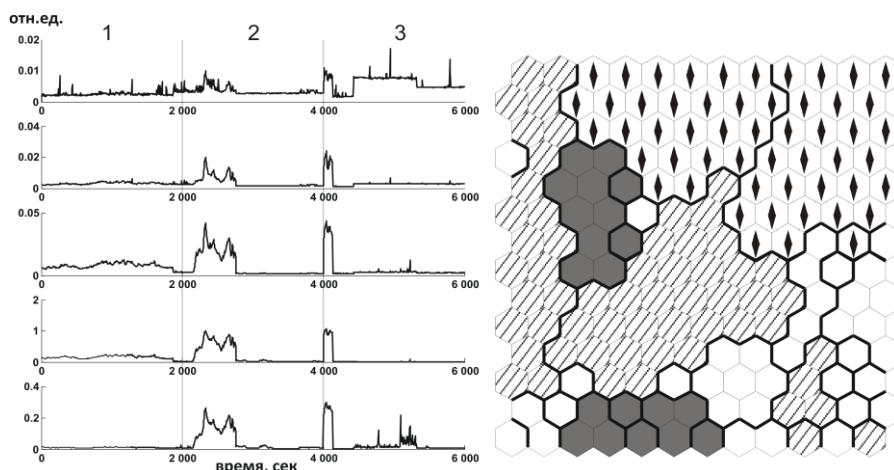


Рис. 3. Пример работы информационной системы.

На левой части рис. 3 показан входной сигнал, расфилтрованный по пяти частотным поддиапазнам. Справа - реакция нейронной сети второго уровня системы. Серым цветом окрашены кластеры, в которые проецируется сигнал, вызванный дождем, в заштрихованные - ветром, с ромбами в центре - возмущение перед землетрясением. Белым цветом изображены кластеры, которые не приняли участие в анализе входного сигнала. Из рис. 3 видно, что разработанная информационная система разделяет сигналы различных видов в группы кластеров, которые не пересекаются. Это говорит о том, что система позволяет принимать правильные решения о типах возмущений.

Литература

1. Дж. Райс. Механика очага землетрясений. М.: Мир. 1982. 217 с.
2. А. Г. Соболев, А. В. Пономарев. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270с.
3. Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений. Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука. 1980. С. 7–44.
4. Алексеев А. С., Белоносов А. С., Петренко В. Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника. // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 81-97.
5. А. В. Купцов, Ю. В. Марапулец, Б. М. Шевцов. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке. // Исследовано в России. 2004. 262. С. 2809-2818. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf>
6. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С.45-59.
7. А. В. Купцов, И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин, А. О. Щербина. Применение нейронных сетей для оценки возмущений геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясений на Камчатке. // Сборник трудов IX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SKM'2006). – С.-Петербург. 2006. т.1. С.238-240.
8. Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин. Реакция нейронной сети на изменение параметров модели геоакустического сигнала. // Сборник трудов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SKM'2008). – С.-Петербург. 2008. т.1. С.250-252.
9. Т. Kohonen. Self-Organizing Maps. Springer, Berlin, 2001.
10. И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин, А. О. Щербина. Нейронные сети на картах Кохонена в задачах оценки возмущений геоакустической эмиссии. // Сборник трудов X Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SKM'2007). – С.-Петербург. 2007. т.1. С.290-292.
11. A. Ultsch and H.P. Siemon. Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis. In Proc. INNC'90, Int. Neural Network Conf., pages 305-308, Dordrecht, Netherlands, 1990. Kluwer.
12. J. Schatzmann. Using Self-Organizing Maps to Visualise Clusters and Trends in Multidimensional Datasets BEng thesis, Imperial College, June 19, 2003 (pdf, <http://mi.eng.cam.ac.uk/~js532/papers/schatzmann03soms.pdf>)
13. Vesanto, J., Data Exploration Process Based on the Self-Organizing Map, Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics and Computing Series No. 115, Espoo 2002, 96 pp. Published by the Finnish Academies of Technology.
14. Arsuaga Uriarte, F. Diaz Martin "Topology Preservation in SOM" PWASET vol. 15, 187-191 (october 2006).