

## СЕЙСМОМАГНИТНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ SEISMOMAGNETIC SIGNALS AS EARTHQUAKES PRECURSORS

В.Е.Корепанов, Ф.Л.Дудкин

Львовский центр Института космических исследований НАН и НКА Украины, vakor@isr.lviv.ua

*The earthquakes (EQ) monitoring in all world reveals that the “seismomagnetic” fluctuations in wide frequency band often occur before these seismic events. We believe that the most reliable information is concentrated in ultra low frequency (ULF) band (0.001-3 Hz). The measurement technology of these signals has several peculiarities. The lithospheric ULF EQ magnetic precursors as a rule are very weak and their frequency range is overlapping with signals of ionospheric origin. The method of their selection at more powerful magnetic variations of other nature background is proposed. For demonstration of newly proposed selection method efficiency, the experimental data from some seismo-hazardous regions are processed and positive results are presented.*

### Введение

Мониторинг землетрясений (ЗТ) во всем мире показывает, что часто перед ними наблюдаются магнитные флуктуации (предвестники), которые можно назвать «сейсмомагнитными» (СМ) сигналами. По нашему мнению, а также экспериментальным данным, которые подтверждены многими исследователями, наиболее надежно СМ сигналы выделяются в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне – от 0.001 до 3 Гц. Также показано, что этот диапазон частот наиболее информативен для выделения краткосрочных предвестников ЗТ – во многих работах утверждается, что магнитные УНЧ предвестники наблюдаются от нескольких недель до нескольких часов перед ЗТ [1-6].

Однако экспериментальное измерение этих сигналов встречается с проблемами, не позволяющими выделить всю возможную их информативность. Прежде всего, УНЧ сигналы литосферного происхождения обычно очень малы и почти полностью перекрываются сигналами ионосферного и магнитосферного происхождения, наблюдаемыми в этом же диапазоне и значительно превышающими литосферные сигналы по амплитуде. Этот факт требует наличия магнитометров с очень низкой пороговой чувствительностью (ПЧ) и широким динамическим диапазоном. Важно отметить также, что наблюдения СМ сигналов должно проводиться в непосредственной близости от очага возможного ЗТ.

Таким образом, необходимо решить две основные задачи. Первое, нужно предложить метод надежного выделения СМ сигналов на фоне других совпадающих по частоте гораздо более мощных природных флуктуаций. Второе, надо создать сверхмалозумящий магнитометр в УНЧ диапазоне, поскольку высокий ПЧ магнитометра может привести к появлению ложных сигналов, ассоциируемых с СМ источниками, что усложняет процедуру идентификации предвестников.

Рассмотрим, прежде всего, механизм генерации этих сигналов. Многие авторы полагают, что СМ предвестники возникают в результате механических напряжений в земной коре перед ЗТ, вызывающих:

- (1) движение проводящей жидкости в магнитном поле Земли (индуктивный эффект) [7-9];
- (2) электрокинетический эффект [10-11];
- (3) смещение границ между блоками земной коры с разной проводимостью [12];
- (4) пьезоэлектрический либо пьезомагнитный эффект [13-16];
- (5) электризация при формировании микротрещин [17]. (Ссылки даны как примеры публикаций).

СМ сигналы в УНЧ диапазоне слабо затухают в земной коре и их магнитные составляющие могут быть обнаружены на расстояниях до 100-150 км [3]. Предложено несколько методов их выделения на фоне упомянутых более мощных флуктуаций другой природы. Один из самых известных – так называемый поляризационный анализ (определение отношения  $S_z/S_H$  спектральных плотностей вертикальной  $S_z$  и горизонтальной  $S_H$  компонент магнитного поля), который многие авторы считали достаточно эффективным для разделения СМ и геомагнитных вариаций [1]. Кроме того, для идентификации направления на источник был предложен градиентометрический метод, основанный на определении разности амплитуд и/или фаз минимум в двух разнесенных точках [18-19]. Однако из-за низкого соотношения сигнал/шум оба эти метода оказались малоэффективными. В их развитие, для определения азимута направления на источник СМ сигналов было предложено изучать поведение большой оси эллипса поляризации (ЭП) этих сигналов [20]. Этот способ позволил определять тренд азимута аномального УНЧ сигнала и, возможно, область локализации эпицентра ЗТ.

Предложено дальнейшее совершенствование метода изучения ЭП вариаций магнитного поля, которое позволило с достаточной точностью определять положение эпицентра ЗТ и, что

самое главное, достаточно надежно выделять СМ сигналы на фоне интенсивных помех. Как будет показано ниже, эффективность его убедительно подтверждена экспериментальными результатами.

### Теоретические основы метода

Предложенный метод основан на изучении ЭП магнитных флуктуаций, измеряемых минимум в двух точках в непосредственной близости ( $\leq 100$  км) к сейсмоактивной области. При его реализации использованы следующие основные положения электродинамики: источник сигнала (магнитный момент магнитного диполя) лежит в плоскости ЭП, образованного его компонентами и большая ось ЭП указывает на источник. Кроме того, приняты следующие допущения.

1. Компоненты магнитного поля (МП) сигналов, связанных с ЗТ, в узком частотном диапазоне в УНЧ-области представлены как гармонические вариации.
2. Токи, генерируемые СМ эффектами, представлены в области источника в виде замкнутых контуров и принимаются эквивалентными токам, возбуждаемым элементарным магнитным диполем, помещенным в области источника на расстоянии до наблюдателя, значительно превышающем размер контура.

Отсюда следует, что, если плоскость ЭП обязательно содержит источник МП, то, наблюдая компоненты МП в двух точках и построив для них ЭП, мы всегда обнаружим магнитный диполь с моментом  $\vec{M}$  на линии пересечения плоскостей обоих ЭП, при этом он будет направлен вдоль этой линии, названной нами М-линией (рис. 1). Подробности вычисления параметров ЭП можно найти в монографиях по электродинамике или, например, в работе [21].

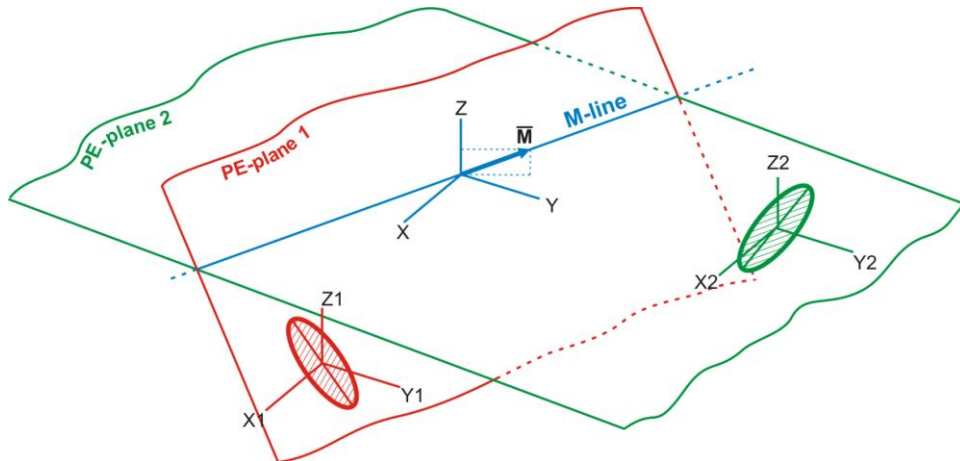


Рис. 1. Формирование М-линии при пересечении двух плоскостей ЭП.

Затем область предполагаемого ЗТ разбивается на блоки требуемого объема. Пусть такой элементарный объем содержит источник СМ сигнала. Тогда М-линия будет обязательно пересекать этот блок, названный М-блоком для удобства изложения (рис. 2).

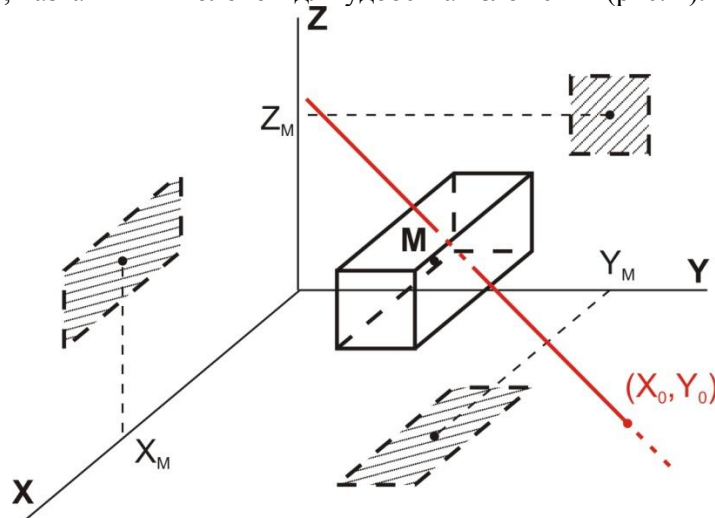


Рис. 2. К определению М-блока.

Далее, для разделения М-линий, связанных с источником СМ сигнала, и таких же линий от удаленных источников (находящихся, например, в ионосфере или искусственного происхождения)

примем следующий очевидный критерий. Если вычислить отношение больших осей ЭП для двух точек наблюдения, то для удаленных источников оно всегда будет близким к единице, а для близких – как правило, значительно больше. На рис. 3 приведен результат вычислений отношения больших осей ЭП в зависимости от азимута горизонтального диполя, расположенного в гипоцентре ЗТ для двух измерительных пунктов, расположенных на полигоне в Индии (Койна и Колапур, провинция Декан). Как видно из этого рисунка, минимальное значение этой величины равно 2, что позволило нам для данного случая принять, что в качестве кандидатов на предвестники ЗТ выбираются только те М-линии, для которых отношение больших осей ЭП больше 2.

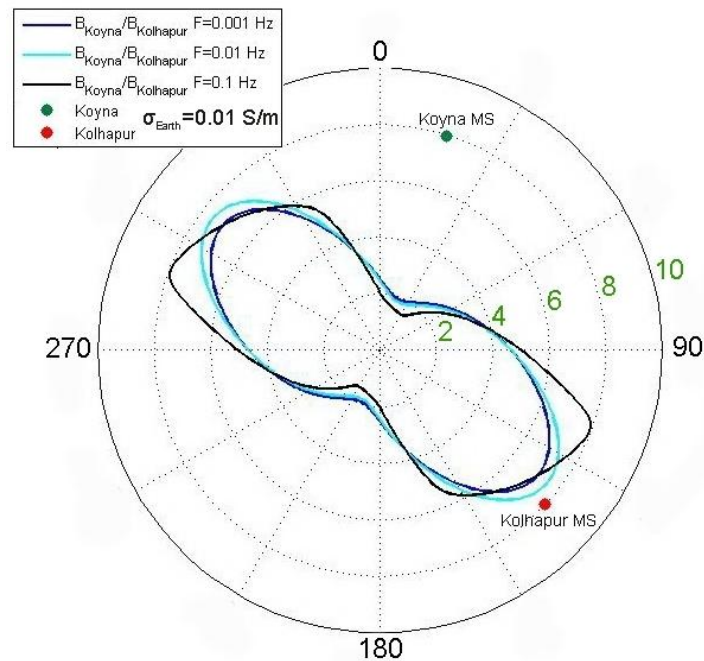


Рис. 3. Отношение больших осей ЭП для сигналов, измеренных в двух точках (Койна и Колапур), отложенные относительно направления магнитного момента.

### Результаты экспериментальных исследований

Для проверки приведенных положений был организован полевой эксперимент в Западной Индии, провинция Декан, где находится сейсмоактивная область Койна-Варна (рис. 4).

За период наблюдений (март-июнь 2006 г.) произошло, кроме множества мелких, 2 ЗТ силой  $M_L = 4,2$  (EQ1, 16 апреля) и  $M_L = 3,8$  (EQ2, 21 мая). На этом же рисунке показано преимущественное направление разломов в этом регионе и большими темными квадратами – расположение двух измерительных станций – Коуна и Колхапур. В качестве измерительных приборов использованы специально разработанные для СМ исследований индукционные магнитометры LEMI-30 [22]. Их отличием является исключительно высокое подавление помех сети ( $>60$  dB) при высокой чувствительности ( $\sim 0,2$  пкТл/Гц<sup>0,5</sup> на частоте 1 Гц) и GPS-синхронизация отсчетов. Рабочий диапазон LEMI-30 перекрывает полосу 0,001-32 Гц, что идеально подходит для записи магнитных сигналов в самой интересной для выявления предвестников ЗТ части УНЧ-диапазона – ниже 0,1 Гц [3, 23]. При обработке полученных данных была использована процедура скользящего усреднения по 64 отсчетам, что снизило верхнюю частоту сигналов до 0,5 Гц. Далее вычислялись динамические спектры Фурье (ДСФ) для каждого суток наблюдения и для каждого отсчета ДСФ строились параметры ЭП для обеих точек наблюдения.

Для проверки эффективности дискриминации ионосферно-магнитосферных источников были построены гистограммы обнаруженных СМ и фоновых сигналов, а также индекс магнитной активности – сумма  $K_p$ -индексов – для апреля и мая 2006 г. (рис. 5, а и б). Сигналы, идентифицированные как ионосферно-магнитосферные, хорошо коррелируют с магнитной активностью, в то же время такая корреляция не наблюдается для СМ сигналов. Количество СМ сигналов растет перед ЗТ EQ1 до 11 апреля (рис. 5а) и затем приближается к нулю перед самым землетрясением, что находится в хорошем соответствии с известным явлением сейсмического «затишья» перед началом ЗТ. После EQ1 в регионе наблюдается очень низкая СМ активность. Примерно такое же поведение наблюдается и в окрестностях ЗТ EQ2, для которого максимальное

число предвестников наблюдается 17 мая и после этого опять спадает непосредственно перед ЗТ. После ЗТ - 23 мая - обнаружен интенсивный сигнал, классифицированный как СМ, однако непосредственно не связанный ни с аномальной сейсмической активностью, ни с ионосферными возмущениями (ввиду низкого уровня  $K_p$ -индексов). Возможно, что этот сигнал также является СМ, вызванным процессом релаксации остаточных механических напряжений после EQ2.

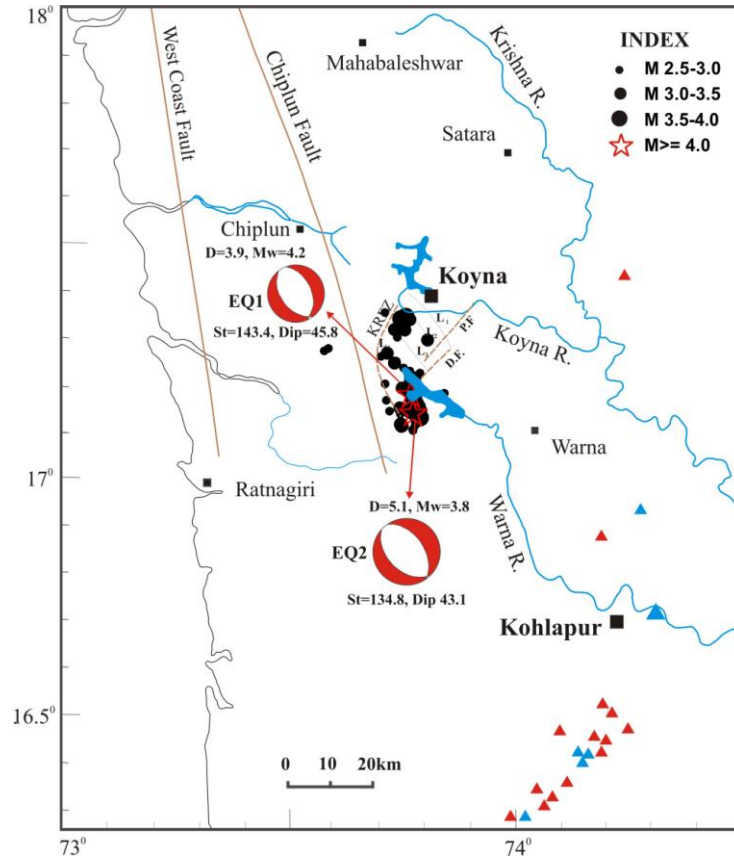
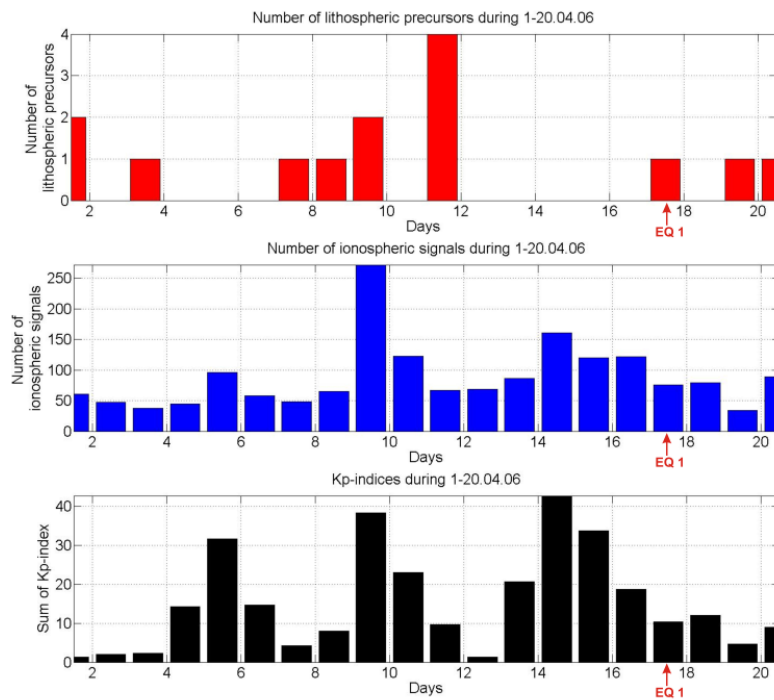
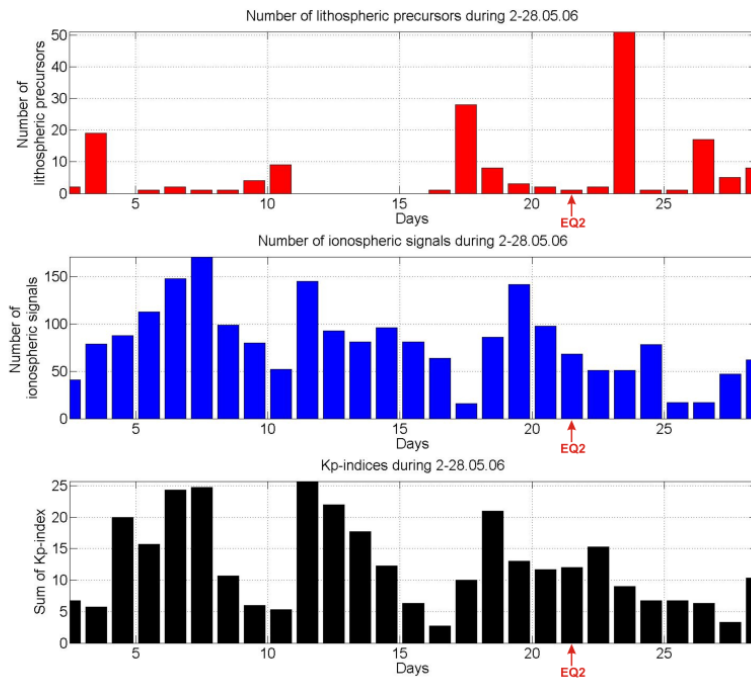


Рис. 4. Карта, показывающая расположение УНЧ-магнитометров (большие квадраты). Черные круги – ЗТ, произошедшие за период наблюдений (март-июнь 2006 г.). Показаны также параметры двух наибольших ЗТ (EQ1 и EQ2) и точки пересечения М-линий с поверхностью Земли (треугольники).



a)



б)

Рис. 5. Число обнаруженных СМ и ионосферных сигналов и индексы геомагнитной активности ( $\Sigma Kp$ ) за апрель-май 2006 г.

В качестве примера, на рис. 6 приведены обнаруженные СМ и ионосферные сигналы за 17, 19 и 20 мая – их частота по вертикальной оси и время появления – по горизонтальной. Как видно, все сигналы, классифицированные как СМ, сосредоточены в достаточно узкой частотной области 0,01-0,07 Гц и совершенно теряются на фоне ионосферных сигналов. Это убедительно показывает, что классификация только по частотному признаку неэффективна, однако добавление критерия отношения больших осей ЭП достаточно надежно разделяет СМ и ионосферные сигналы, как показывает рис. 5. По-видимому, для других сейсмоактивных районов критерий отношения больших осей ЭП может быть и другим. Отличие такого критерия от «оптимального» приводит либо к усилению «загрязнения» СМ предвестников ионосферными сигналами при его понижении, либо к их пропуску при его повышении.

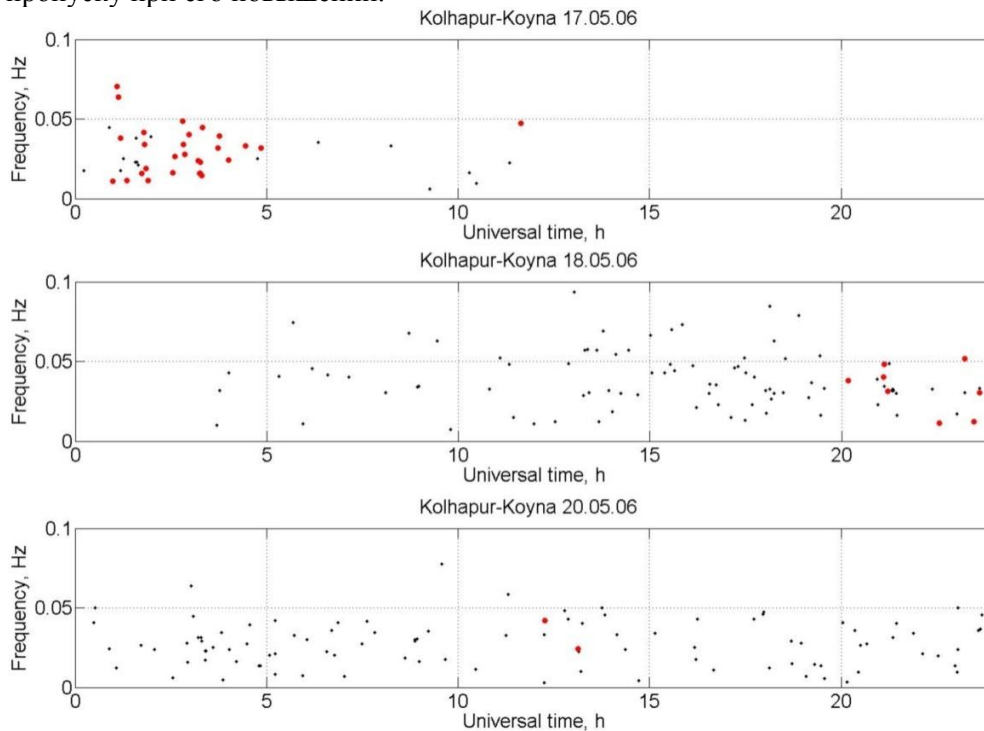


Рис. 6. Распределение ионосферных (малые точки) и СМ (большие точки) сигналов в координатах частота-время для 17, 18 и 20 мая 2006 г.

Вернемся к рис. 4. Для всех М-линий, соответствующих СМ источникам, на рис. 4 приведены их точки пересечения с поверхностью Земли. Хорошо видно, что азимут линий от кластера точек, где они пересекают земную поверхность, в направлении на эпицентры ЗТ практически совпадает с направлением местных разломов, вдоль которых и сосредоточены эпицентры. Расчеты показывают, что азимутальные направления М-линий ионосферных сигналов распределены в довольно широких пределах.

В заключение можно сказать, что предложенный метод выделения СМ сигналов успешно прошел экспериментальную апробацию. Однако он нуждается в дополнительной верификации на большом объеме экспериментальных данных для уточнения специфики его применения в различных сейсмоактивных районах, что и является целью дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке договора с УНТЦ 4818.

#### Литература

1. Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O.A., Yumoto, K., Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 241–244, 1996.
2. Hayakawa, M., Itoh, T., Hattori, K., Yumoto, K., ULF electromagnetic precursors for an earthquake in Biak, Indonesia on 17 February 1966, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1531–1534, 2000.
3. Hayakawa, M., Hattori, K., Ohta, K., Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) Geomagnetic Variations Associated with Earthquakes, *Sensors*, 7, 1108–1122, 2007.
4. Molchanov, O.A., Hayakawa, M., Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3091–3094, 1995.
5. Molchanov, O.A., Kopytenko, Yu.A., Voronov, P.M., Kopytenko, E. A., Matiashvili, T.G., Fraser-Smith, A.C., Bernardy, A., Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ( $M_s = 6.9$ ) and Loma Prieta ( $M_s = 7.1$ ) earthquakes: comparative analysis, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1495–1498, 1992.
6. Molchanov, O.A., Schekotov, A.Yu., Fedorov, E., Belyaev, G.G., Solovieva, M.S., Hayakawa, M., Preseismic ULF effect and possible interpretation, *Annals of Geophysics*, 47 (1), 119–131, 2004.
7. Surkov V. V., ULF electromagnetic perturbations resulting from the fracture and dilatancy in the earthquake preparation zone, pp. 357–370, in "Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes", ed. by M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.
8. Fedorov E., Pilipenko V., Uyeda S., Electric and Magnetic Fields Generated by Electrokinetic Processes in a Conductive Crust, *Phys. Chem. Earth (C)*, 26 (10–12), 793–799, 2001.
9. Surkov V.V., Molchanov O.A., Hayakawa M., Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65 (1), 31–46, 2003.
10. Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T., Ohnishi, S., Electrokinetic phenomena associated with earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 365–368, 1976.
11. Fitterman, D.V., Theory of electrokinetic magnetic anomalies in a faulted half-space, *J. Geophys. Res.*, 84 (B11), 6031–6040, 1979.
12. Dudkin, F., De Santis, A., Korepanov, V., Active EM sounding for early warning of earthquakes and volcanic eruptions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 139 (3, 4), 187–195, 2003.
13. Martin, R.J., Habermann, R.E., Wyss, M., The effect of stress cycling and inelastic volumetric strain on remanent magnetization, *J. Geophys. Res.*, 83, 3485–3496, 1978.
14. Ogawa, T., Oike, K., Miura, T., Electromagnetic Radiations from Rocks, *J. Geophys. Res.*, 90 (D4), 6245–6249, 1985.
15. Johnston M.J.S., Muller J.S. and Sasai, Y., Magnetic field observations in the near field: the 28 June, 1992 Mw 7.3 Landers, California Earthquake, *Bull Seism. Soc. Am.*, 84, 792–798, 1994.
16. Ogawa, T., Utada, H., Coseismic piezoelectric effects due to a dislocation. 1. An analytic far and early-time field solution in a homogeneous whole space, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 121, 273–288, 2000.
17. Kopytenko, Yu.A., Ismaguilov, V.S., Hayakawa, M., Smirnova, N., Troyan, V., Peterson, T., Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and perspectives, *Annali di Geofisica*, 44 (2), 325–334, 2001.
18. Kopytenko, Yu.A., Ismaguilov, V.S., Hattori, K., Hayakawa, M., Determination of hearth position of forthcoming strong EQ using gradients and phase velocities of ULF geomagnetic disturbances, *Phys. Chem. Earth*, 31, 292–298, 2006.
19. Du, A., Huang, Q., Yang, S., Epicenter location by abnormal ULF electromagnetic emissions, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10), 1455–1458, 2002.
20. Morgan, M., Evans, W., Synthesis and analysis of elliptic polarization loci in terms of space-quadrature sinusoidal components, *Proc. IRE*, 39, 552–556, 1951.
21. www.isr.lviv.ua
22. Hayakawa, M., Molchanov, O.A., and NASDA/UEC team, Achievements of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project, *TAO*, 15 (3), 311–327, 2004.