

# КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ СВЯЗИ ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ИОНОСФЕРА

## COMPLEX MODEL OF LITHOSPHERE-ATMOSPHERE-IONOSPHERE COUPLING

*С.А. Пулинец*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)*

The Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model created recently is able to explain simultaneously the thermal anomalies observed in the boundary layer (BL) of atmosphere and ionospheric anomalies observed in all layers of the ionosphere before strong earthquakes by common physical mechanism, having as a principle source the air ionization by increased radon release over active tectonic faults. We name these anomalies as thermal and ionospheric branches of the model. But these branches are not independent; they interact and provide the energy one to another for self-development. Electric properties of the large ion clusters change the chemical potential (work function of evaporation) what makes the clusters more stable and this permits to attach more water molecules and consequently to release more latent heat. The thermal energy released during the process of water molecules attachment to ions creates the upward convective flux which is the source of the additional electric field generation and amplification. The intermediate products of this interaction between branches are increased concentration of the aerosols in the boundary layer and formation of so called earthquake clouds. All the parts of the presented model are supported by satellite and ground based measurements of atmospheric and ionospheric parameters of major recent earthquakes.

### **1. Выбор базовых составляющих модели**

Факт наличия аномальных вариаций космической плазмы, предвещающих землетрясение, в настоящее время можно считать доказанным и хорошо документированным [14]. Что касается природы сейсмо-ионосферных связей во всех их проявлениях, начиная от поверхности земли, через процессы в атмосфере к ионосферным вариациям, то тут существует масса различных вариантов, разработанных разными авторами. Однако все идеи можно разбить на две основные группы: акустическая гипотеза, предлагающая в качестве источника возмущений в ионосфере акустико-гравитационные волны, возбуждаемые механическими колебаниями у поверхности земли, и электромагнитная гипотеза, предлагающая в качестве источника возмущений электромагнитные (электрические) поля, возбуждаемые у поверхности земли и затем проникающие (или индуцирующие поля) в ионосферу (Рис. 1 [20]). Попробуем по рецепту Микельанджело рассматривать всю эту массу гипотез как некую глыбу мрамора, и будем в процессе обсуждения отсекаать все ненужное, чтобы приблизиться к истине.

Принимая во внимание, что сейсмический толчок вызывает колебания воздуха и факт усиления этих колебаний с высотой из-за экспоненциального падения давления, вполне естественно, что долгое время преобладающей была гипотеза возбуждения вариаций в ионосфере с помощью акустико-гравитационных волн. Эту идею даже зарегистрировали как открытие [5]. В качестве источников возмущения в различных моделях предлагались микросейсмь перед главным толчком, выбросы газа или термальные волны. Однако проблема состояла в том, что возмущения, наблюдаемые в ионосфере после землетрясения, были на несколько порядков меньше, чем перед землетрясениями, хотя никаких экспериментальных доказательств каких-либо механических колебаний атмосферы перед землетрясением не было получено. Защитники гипотезы акустико-гравитационных волн утверждали, что колебания, вызываемые сейсмическим толчком – короткопериодные, и неэффективны с точки зрения возбуждения акустико-гравитационных волн. Проблема разрешилась после разрушительного цунами, возникшего в результате землетрясения на Суматре 26 декабря 2004 г. Гигантская длиннопериодная волна, обогнувшая весь земной шар, возбудила в ионосфере

возмущения порядка всего 0.16 ТЕС [10], в то время как перед землетрясением наблюдались аномальные вариации в несколько десятков единиц ТЕС [17]. Оценки

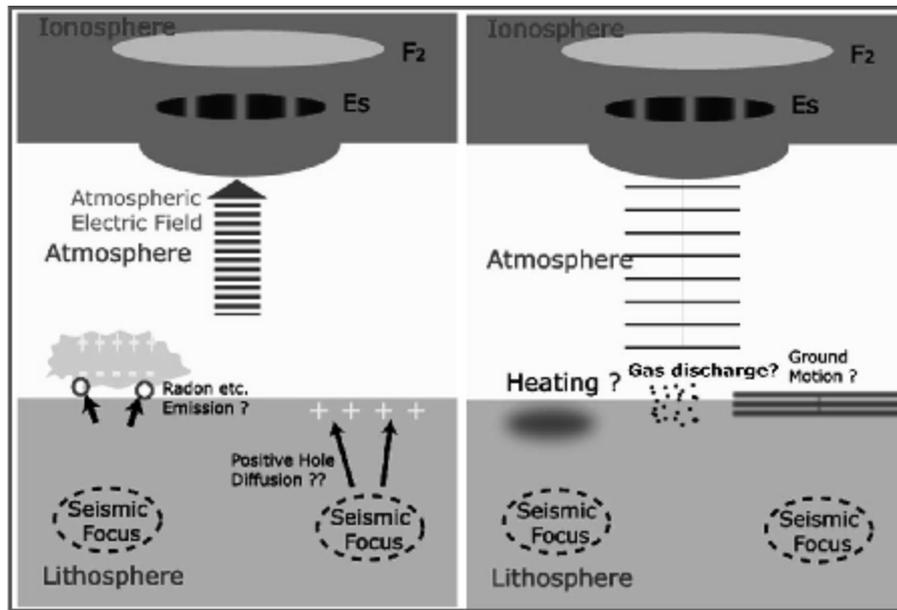


Рис.1. Схематическое представление существующих моделей сейсмо-ионосферных связей [20].

показывают, что гипотеза акустико-гравитационных волн «не дотягивает» до реальности около 5 порядков величины, и поэтому правая часть рисунка 1 может быть исключена из рассмотрения.

Обратимся к левой части Рис. 1. Модели этого класса предполагают воздействие на ионосферу аномального электрического поля, проникающего с поверхности земли. Существуют разные варианты механизмов генерации этого поля, которые можно свести к двум основным: стрикционный механизм, и генерация электрического поля в атмосфере в результате ионизации воздуха радоном. Из моделей первого типа наиболее цитируемой является модель [7], где предлагается формирование поверхностного положительного заряда за счет «дырочной» проводимости, возникающей в земной коре под воздействием напряжения. Ее недостатками являются: а) модель может объяснить только один знак аномального электрического поля – отрицательные вариации, хотя имеется большое количество ссылок, где приводятся примеры больших положительных электрических полей, регистрируемых перед землетрясением [4]; б) для генерации «дырочной» проводимости необходимы специальные виды пород вулканического происхождения или граниты, что не всегда имеет место; в) модель не может объяснить возникновение аномалий, когда эпицентр землетрясения находится в океане.

Таким образом, вполне естественным путем мы пришли к единственному возможному варианту модели, развиваемому в течение последних 15 лет.

## 2. Естественная радиоактивность и электричество приземной атмосферы

Установлено [8], что основным источником ионизации в приповерхностном слое атмосферы является естественная радиоактивность Земли, при этом основной вклад в ионизацию вносит радон и его дочерние продукты. В результате распада радон испускает энергичные  $\alpha$ -частицы ( $\sim 5.8$  МэВ). Учитывая, что потенциал ионизации атмосферных газов лежит в пределах 15-30 эВ, одна  $\alpha$ -частица может породить порядка  $5 \cdot 10^5$  ион-электронных пар. Первичные ионы вступают в химические реакции, образуя новые соединения. Из-за высокой поляризации молекул водяного пара они присоединяются к вновь образованным ионам (реакция гидратации), что приводит к образованию более тяжелых ионов и ионных кластеров. К одному иону может присоединиться более 100 молекул воды. Основными ионами, образуемыми в результате ионизации, химических

реакций и гидратации являются:  $\text{NO}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $\text{NO}_3^-(\text{HNO}_3)_n(\text{H}_2\text{O})_m$ ,  $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O})$ ,  $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_m$  и  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  [15]. Водная оболочка предохраняет ионы от рекомбинации благодаря высокому дипольному моменту. Известно [1, 9], что концентрация радона повышена в областях тектонической активности, в особенности вблизи активных тектонических разломов. При повышении уровня ионизации повышается химический потенциал (энергия связи) молекул воды, в результате чего ионы становятся более стабильными и растет количество больших ионов. С точки зрения атмосферного электричества основным качеством тяжелых ионных кластеров является их малая подвижность, что приводит к резкому падению проводимости приземного слоя атмосферы, уменьшению вертикального тока хорошей погоды, и в результате, увеличению разности потенциалов между землей и ионосферой в глобальной электрической цепи. В ионосфере образуются локальные неоднородности повышенного электрического потенциала, и, соответственно, горизонтальные градиенты электрического поля, приводящие к образованию крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации и вариациям температуры плазмы [3]. Пространственные размеры неоднородностей определяются размером области подготовки землетрясения, связанным с магнитудой  $M$  землетрясения соотношением  $R = 10^{0.43M}$  [2].

### 3. Тепловые и атмосферные эффекты ионизации

Процесс гидратации ионов, образуемых в результате ионизации радоном, эквивалентен конденсации молекул воды на ионах, в результате чего выделяется скрытая теплота испарения  $Q=40.683$  кДж/моль (при температуре кипения). Теплота на одну молекулу  $U_0=Q/N_A=0.422$  эВ где  $N_A=6.022 \cdot 10^{23}$  1/моль (число Авогадро). Ионный кластер растет до некоторой  $m_{max}$ . Количество выделенной энергии при этом будет равно:  $w = m_{max}U_0$ . Если источник ионизации производит ионы со скоростью  $dN/dt$ , то тепло, выделяемое в атмосферу может быть выражено как  $P_a = w \cdot dN/dt$ . При этом атмосфера играет роль практически неисчерпаемого резервуара энергии, запасенной в водяном паре. Лабораторные эксперименты показывают, что коэффициент усиления этого процесса: количество выделенной энергии/количество энергии, затраченной на ионизацию превышает величину  $10^8$ . Не удивительно, что процесс подготовки землетрясения сопровождается повышением температуры воздуха и понижением влажности [16], а инфракрасные спектрометры, установленные на спутниках дистанционного зондирования, регистрируют крупномасштабные тепловые аномалии над областями подготовки землетрясений [12]. Это открывает новые возможности трассирования радоновой активности по данным спутников дистанционного зондирования.

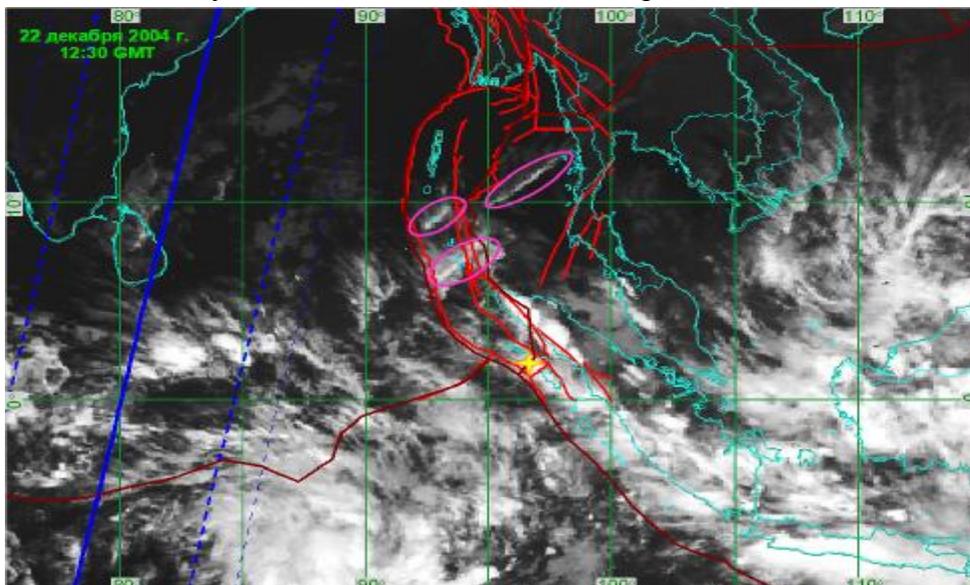


Рис.2. Пример линейных облаков (обведено овалом) зарегистрированных 22 декабря 2004 г. [6].

Повышение приповерхностной температуры воздуха приводит к образованию восходящих конвективных потоков над областями активных тектонических разломов. Вертикальные потоки теплового воздуха поднимают ионные кластеры на высоты образования облаков. В результате образуются линейные облачные структуры, фактически повторяющие форму разлома [6]. Фактически этот поток, несущий заряженные ионы, представляет собой плоский токовый слой. В результате воздействия силы Лоренца облака могут быть повернуты относительно разлома, являющегося их источником. Пример облаков такого типа, зарегистрированных перед землетрясением на Суматре (M9.0б 26.12.2004) приведен на Рис. 2. Конвективный поток может служить дополнительным источником усиления аномального электрического поля над тектоническим разломом [11, 19].

#### 4. Апробация модели и разработка практических приложений

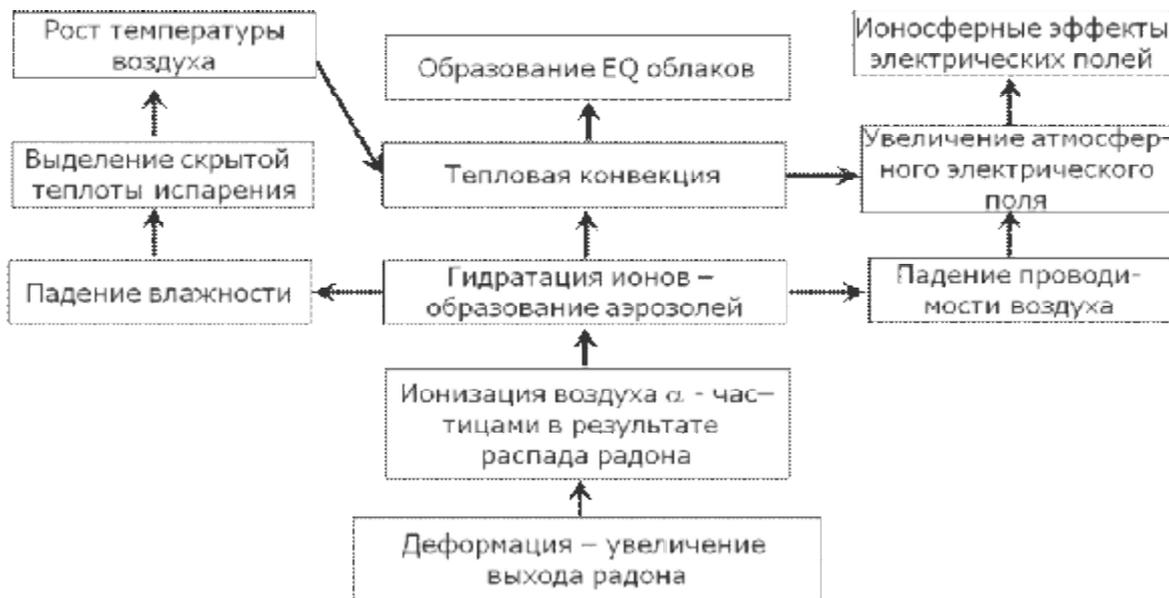


Рис.3. Схематическое представление комплексной модели связи Литосфера-Атмосфера-Ионосфера.

На Рис. 3 представлена схема модели, из которой видно, что ее можно условно разделить на 2 ветви – атмосферную (тепловые эффекты) и ионосферную (электромагнитные эффекты), причем они взаимодействуют на разных уровнях. Примером такого взаимодействия может служить дополнительный механизм генерации аномального электрического поля за счет тепловой конвекции. Многообразие проявлений связи Литосфера-Атмосфера-Ионосфера позволяет измерять одновременно большое количество параметров атмосферы и ионосферной плазмы, причем целенаправленно, принимая во внимание оценки параметров, полученные в рамках развития модели. Примером многопараметрического анализа может служить публикация [16], где одновременно анализируются метеорологические параметры (температура и влажность), потоки скрытой теплоты испарения, распределение поверхностной температуры и тепловые аномалии с помощью методов дистанционного зондирования, и ионосферные аномалии в период сильного (M7.8) землетрясения в Мексике вблизи города Колима 22 января 2003 г. В качестве основных параметров, которые можно рекомендовать для мониторинга процесса подготовки сильного землетрясения, мы предлагаем использовать вариации концентрации радона, наличие аэрозолей (если существует возможность, измерение высотного профиля), вертикальное электрическое поле (на наш взгляд, более информативным параметром может оказаться вертикальный ток в атмосфере), температура и влажность воздуха, форма и положение облаков над тектоническими разломами, пространственное распределение электронной концентрации в ионосфере над областью подготовки сильного землетрясения, измеряемое различными методами

(вертикальное зондирование, спутниковая ионосферная томография, полное электронное содержание, зондовые измерения на борту ИСЗ), вариации температуры электронов и ионов в ионосфере, массовый состав ионов в ионосфере. К сожалению, по разным причинам пока не удается провести измерения полного набора параметров, указанных выше, но даже несколько независимых параметров, измеряемых одновременно, позволяют установить, что модель работает. В качестве примера в дополнение к Рис. 2, где показаны линейные облака над Суматрой 22 декабря 2004 на Рис. 4 и 5 показано наличие для того же самого дня наличие тепловой аномалии, измеренной с помощью спутников NOAA [13], и аномальных вариаций полного электронного содержания, рассчитанного по данным сети приемников системы GPS в регионе землетрясения [17].

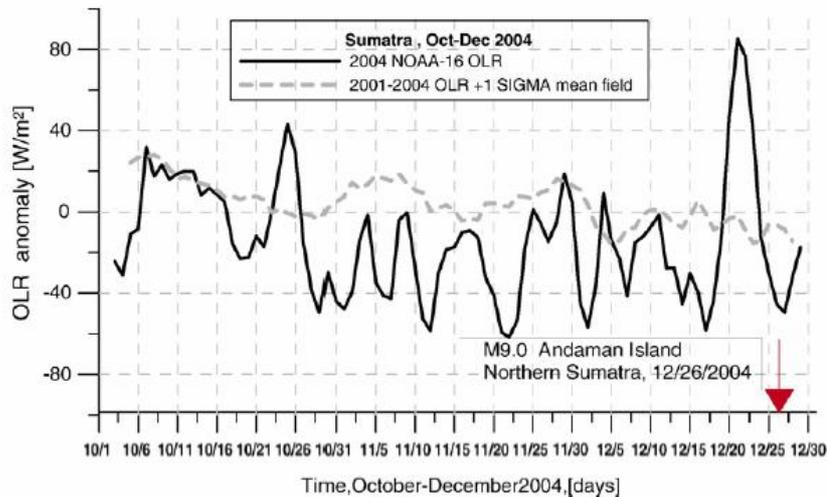


Рис.4. Сплошная кривая – вариации уходящего потока инфракрасного излучения по данным спутника NOAA в период октябрь-декабрь 2004 г., штриховая кривая – средний поток за 4 года для тех же месяцев  $\pm\sigma$ .

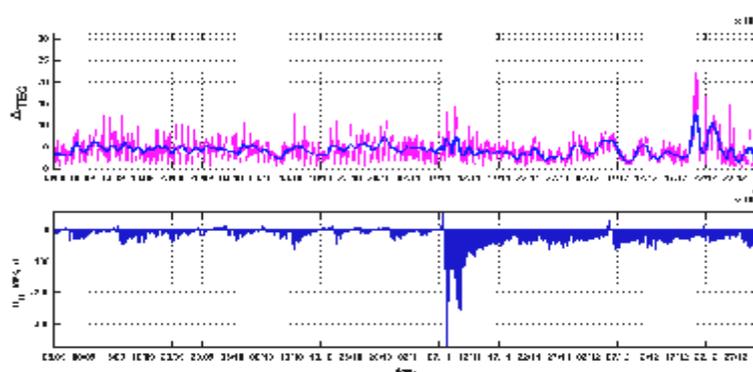


Рис.5. Верхняя панель – индекс региональной ионосферной изменчивости [18] по данным сети станций GPS, нижняя панель – геомагнитный Dst индекс.

Показанный на Рис. 5 индекс региональной изменчивости ионосферы является одним из примеров разработанных нами практических приложений для автоматического выделения ионосферных вариаций, связанных с подготовкой землетрясения [18]. Он использует эффект повышенной изменчивости ионосферы над областью подготовки сильного землетрясения, связанный с локальными изменениями атмосферного электричества и параметров глобальной электрической цепи. При этом даже вариации во время сильных геомагнитных возмущений иногда оказываются ниже, чем перед землетрясением.

## 5. Заключение

Разработанная комплексная модель связи Литосфера-Атмосфера-Ионосфера позволяет в рамках единого физического механизма, связанного с процессами ионизации атмосферы радоном, выделяемым над активными тектоническими областями, объяснить

ряд физических процессов в атмосфере и ионосфере, наблюдаемых в период подготовки сильного землетрясения. Результаты исследования могут быть использованы для разработки практических приложений, целью которых является краткосрочный прогноз разрушительных землетрясений.

#### Список литературы

1. Беляев А.А. Особенности радоновых прогнозных признаков землетрясений // Геохимия. 2001. № 12. С.1355-1360.
2. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М. : ИФЗ РАН, 1991. – 217 с.
3. Пулинец С.А., Легенька А.Д. Пространственно-временные характеристики крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации, наблюдаемых в области  $F$  ионосферы перед сильными землетрясениями // Косм. иссл. 2003. Т. 41, № 3. С. 240-249.
4. Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57-68.
5. Таранцев А.В., Бирфельд Я.Г. Явление воздействия сейсмичности Земли через акустические волны на ионосферу. – Сб. кратких описаний открытий, ЦНИИПИ, открытие. 1973. № 128.
6. Doda L., Pulinets S., Earthquake clouds and physical mechanism of their formation, AGU Fall Meeting, Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T31A-0426, 2006.
7. Freund F., Charge generation and propagation in igneous rocks // J. of Geodynamics, 2002. 33, 543–570.
8. Hoppel W.A., Anderson R.V., Willet J.C., Atmospheric Electricity in the Planetary Boundary Layer, The Earth's Electrical Environment, National Academic Press, Washington, 1986. 149-165.
9. King C.-Y. Gas geochemistry applied to earthquake prediction. An overview // J. Geophys. Res. 1996. 91, 12, 269-12, 281.
10. Liu J.-Y. et al., Ionospheric GPS total electron content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami, JGR, 111, A05303, doi:10.1029/2005JA011200, 2006.
11. Morozov N. The influence of convective current generator on the global current, Nonlinear Processes in Geophysics, 2006. V.13. P. 243-246.
12. Ouzounov D., Bryant N., Logan T., Pulinets S., Taylor P., Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999-2003, Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V.31. P. 154-163.
13. Ouzounov D. et al. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics. 2007. V. 431. P. 211-220.
14. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer, Berlin, Germany. 2004. – 315 p.
15. Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A., The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V.31, P.143-153.
16. Pulinets S.A., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajacka M., Karelin A., Boyarchuk K.A., Kotsarenko A, Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 // Annales Geophysicae. 2006. V. 24. P. 835-849.
17. Pulinets S., Kotsarenko A., Ciraolo L. GPS TEC variations before the Sumatra M9 earthquake of Dec. 26 2004 as a possible short-term precursors // International Journal of Remote Sensing, in press.
18. Pulinets S.A., Kotsarenko A.N., Perez-Enriquez R., Ciraolo L., Pulinets I.A. New Ionosphere variability Index and its Anomaly Variation Related to Major Earthquakes Occurred in California, USA and Mexico, Proceedings of the 6th International Conference “PROBLEMS OF GEOSMOS”, St. Petersburg, Petrodvorets May 23-27, 2006. 2006. 375-379.
19. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., and Hayakawa M., DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults, Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V. 5. P. 661-666.
20. Uyeda S., Overview of some developing aspects in earthquake science and prediction, EMSE Workshop, 3-4 Nov. 2005. Puerto Vallarta, Mexico. 2005.