

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
КАК ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

**NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRIC FIELD EFFECTS AS
EARTHQUAKE PRECURSORS IN THE OUTER IONOSPHERE OF THE EARTH**

М.В. Клименко¹, А.А.Намгаладзе², В.В. Клименко³, В.В. Брюханов¹

¹Калининградский государственный технический университет

²Мурманский государственный технический университет

³Западное Отделение ИЗМИРАН

The results of the numerical calculations of the electric field effects as the earthquake precursors in the outer ionosphere of the Earth are presented. The calculations were performed using the global numerical ionosphere-plasmasphere model including the modified block of the electric potential calculation. The sources of seismic electric fields were included in the model as additional potentials at the western and eastern boundaries of the near-epicentral areas added to the usual ionospheric potential pattern. Two such areas located at mid- and low latitudes corresponding to the earthquakes in Rome and Vanimo were considered. We obtained in calculations the additional zonal electric fields of seismic origin of about 3-9 mV/m. The model results show that such electric fields produce considerable variations in the electron concentration, ion composition and heat balance of the cold plasma in the outer ionosphere of the Earth in agreement with the observations.

В данной работе представлены результаты численных расчетов эффектов восточного электрического поля, описанного в работе [9], как предвестников землетрясений во внешней ионосфере Земли. Расчеты были выполнены с использованием Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), разработанной в Западном отделении ИЗМИРАН [8, 14, 16, 17]. Модель дополнена новым блоком расчета электрических полей в ионосфере динамо и магнитосферного происхождения [3, 4]. В этом блоке решение трехмерного уравнения, описывающего закон сохранения полного тока в ионосфере Земли, осуществляется приведением его к двумерному интегрированием по толщине токопроводящего слоя ионосферы не по высоте, как это было в первом варианте модели, а вдоль силовых линий геомагнитного поля. Это позволило корректно описывать распределение электрического поля вблизи геомагнитного экватора.

Эффекты сильных землетрясений в верхней ионосфере, выявленные с помощью искусственного спутника Земли "Ореол-3", описаны в работе [1]. Об изменениях ионного состава, плотности и температуры тепловой плазмы, зарегистрированных на спутниковых орбитах над эпицентром будущего землетрясения сообщалось в работе [15]. О наличии вариаций параметров внешней ионосферы в преддверии землетрясений отмечалось [21], которые представили упрощенную модель диффузионного равновесия для оценки параметров распределения легких ионов в верхней ионосфере и проанализировали роль дрейфа частиц, связанного с локализованными квазистатическими электрическими полями, а также других факторов, воздействующих на распределение ионов во внешней ионосфере. В работе [20] вариации параметров внешней ионосферы в преддверии землетрясений также связывались с эффектами электрических полей как ионосферного, так и внеионосферного происхождения. Измерения электрических полей в ионосфере в периоды землетрясений представлены [5, 6, 12, 19, 22-25]. Вопросы проникновения электрического поля из литосферы в ионосферу перед землетрясениями рассматривались [13]. Электродинамические модели ионосферных предвестников землетрясений представлены в работах [10, 11].

В работах [9, 18] был проведен анализ возможных физических механизмов формирования возмущений полного электронного содержания с характерными для предвестников пространственными и временными масштабами и было высказано

предположение, что главной причиной возникновения областей повышенного полного электронного содержания в ионосфере, наблюдаемых с использованием измерений задержек сигналов спутников GPS перед сильными землетрясениями [2], является вертикальный перенос плазмы F2-области ионосферы вверх под действием зонального электрического поля, направленного на восток.

Сейсмогенные источники электрического поля в данной работе, как и в работе [7], задавались наложением дополнительных потенциалов на западной и восточной границах вблизи эпицентральных областей, расположенных в средних и низких широтах и соответствующих землетрясениям в Риме ($\Phi = 45^\circ$, $\Lambda = 90^\circ$) и Ванимо ($\Phi = -15^\circ$, $\Lambda = 210^\circ$). На восточных границах эпицентральной области в Риме задавался дополнительный потенциал, равный -10 кВ, а на западных 10 кВ. На границах эпицентральной области в Ванимо потенциал задавался в 2 раза меньше. Дополнительные сейсмогенные зональные электрические поля, полученные в расчётах, составили в окрестности Рима $5-7$ мВ/м и в окрестности Ванимо $1-2$ мВ/м. Результаты численных расчетов параметров внешней ионосферы Земли для условий сильных землетрясений показали, что при высказанных предположениях о параметрах сейсмогенных источников электрического поля перед землетрясениями происходят значительные изменения электронной концентрации, ионного состава и теплового баланса холодной плазмы во внешней ионосфере Земли, что согласуется с результатами наблюдений.

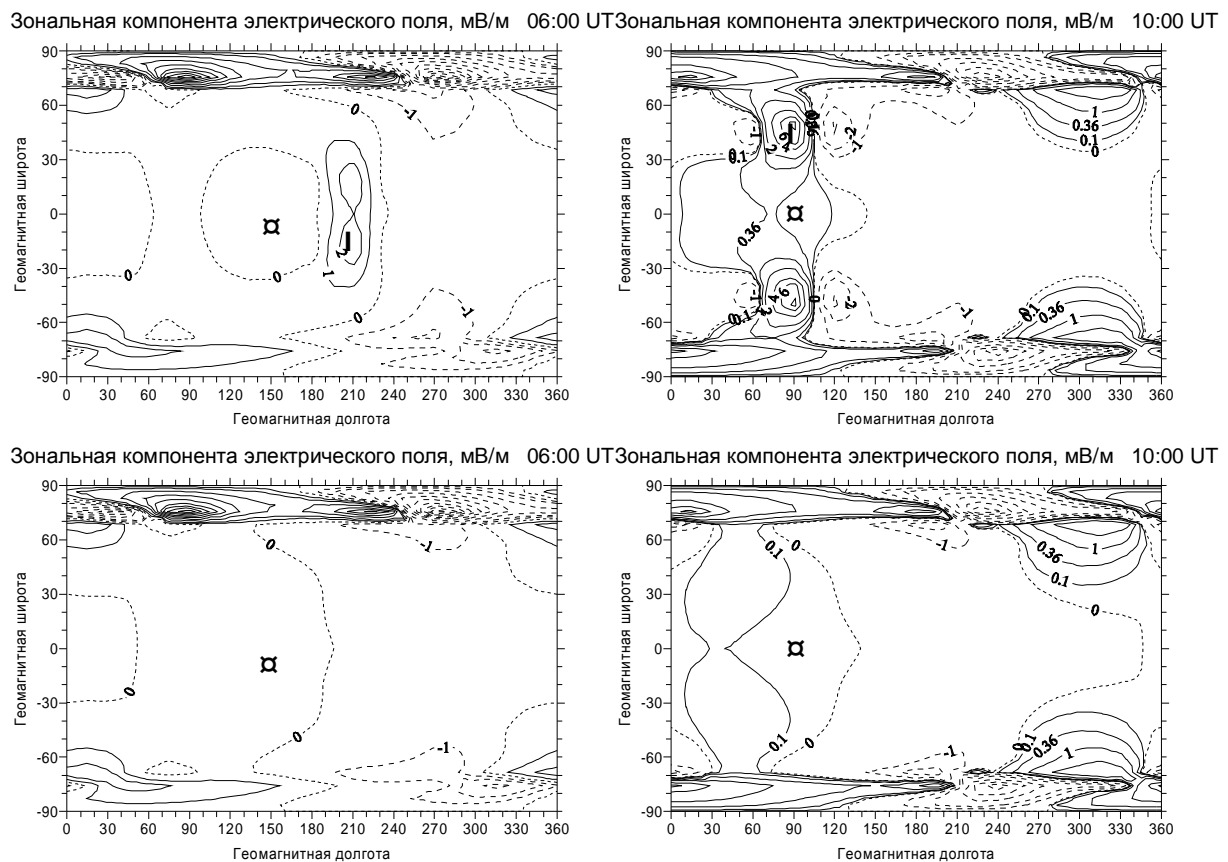


Рис. 1

На рис. 1 в декартовой геомагнитной системе координат долгота-широта показаны рассчитанные в модели глобальные распределения зональной компоненты электрического поля. На левой панели показаны результаты расчетов для случая землетрясения в Ванимо для 06:00 UT. На правой панели показаны результаты расчетов для случая землетрясения в Риме для 10:00 UT. Внизу показаны результаты расчетов для спокойных условий. Вверху показаны результаты расчетов зональной компоненты

электрического поля, полученные с учетом сейсмогенных источников электрического поля.

На рис. 2 в декартовой геомагнитной системе координат долгота-широта показаны изменения электронной концентрации, концентраций атомарных ионов O^+ и H^+ и ионной и электронной температур на высоте 1500 км, представленные в виде отношений значений этих параметров перед землетрясением к их невозмущенным значениям. На левой панели представлены результаты расчетов для землетрясения в Ванимо для 06:00 UT. На правой панели представлены результаты расчетов для землетрясения в Риме для 10:00 UT. Пунктирными кривыми показаны изолинии, на которых значения параметров не меняются, то есть на которых отношение возмущенных значений к спокойным равно 1.

Из рис. 2 видно, что перед землетрясением в Ванимо на высоте 1500 км происходит рост электронной концентрации над эпицентральной и магнитно-сопряженной областями, простирающийся к геомагнитному экватору. Максимумы положительных возмущений несколько смещены к полюсам относительно эпицентральной и магнитно-сопряженной точек. Это связано с тем, что помимо подъема плазмы электромагнитным дрейфом в низких широтах происходит еще и её диффузионный перенос в сторону соответствующего геомагнитного полюса. Максимальный рост N_e в 06:00 UT имеет место не в эпицентральной, а в магнитно-сопряженной области. При этом электронная концентрация возрастает более чем в 1.5 раза. По обе стороны от области положительных возмущений по долготе формируются области понижения электронной концентрации $\sim 10\%$. Аналогичная картина имеет место для землетрясения в Риме, но в этом случае положительные эффекты максимальны над эпицентральной областью и превышают фактор 2.2, а в областях понижения электронной концентрации достигают $\sim 20\%$.

В распределении концентрации ионов O^+ формируется область положительных возмущений с максимумом вблизи геомагнитного экватора, несколько смещенным в случае обоих землетрясений в северное полушарие. Максимальный рост $n(O^+)$ в случае землетрясения в Ванимо превышает фактор 5, тогда как при землетрясении в Риме этот рост не превышает фактора 2.5. По обе стороны от области положительных возмущений по долготе формируются области понижения концентрации ионов O^+ до $\sim 40\%$ в случае землетрясения в Ванимо и до $\sim 20\%$ в случае землетрясения в Риме.

Рост концентрации ионов O^+ на высоте 1500 км связан с её увеличением в максимуме F2-слоя, описанным в работе [7], и соответствующим увеличением диффузионного поступления ионов O^+ во внешнюю ионосферу.

В распределении концентрации ионов H^+ , в отличие от рассмотренных выше распределений электронной концентрации и концентрации ионов O^+ , в случае землетрясения в Ванимо формируется область отрицательных возмущений с тремя минимумами: на геомагнитном экваторе, где падение $n(H^+)$ превышает 60% и в областях несколько смещенных от эпицентральной и магнитно-сопряженной точек в сторону полюсов, где падение $n(H^+)$ составляет $\sim 40\%$. В случае землетрясения в Риме на геомагнитном экваторе формируется область отрицательных возмущений $n(H^+)$, в которой значения концентрации ионов H^+ падают на $\sim 10\%$. Над эпицентральной и магнитно-сопряженной областями формируются области положительных возмущений с ростом $n(H^+)$ более, чем в 2.5 раза. А по обе стороны по долготе от этих областей формируются области отрицательных возмущений $n(H^+)$, несколько смещенные в сторону геомагнитного экватора относительно эпицентральной и магнитно-сопряженной точек, в которых концентрация ионов H^+ может падать в 1.5 раза.

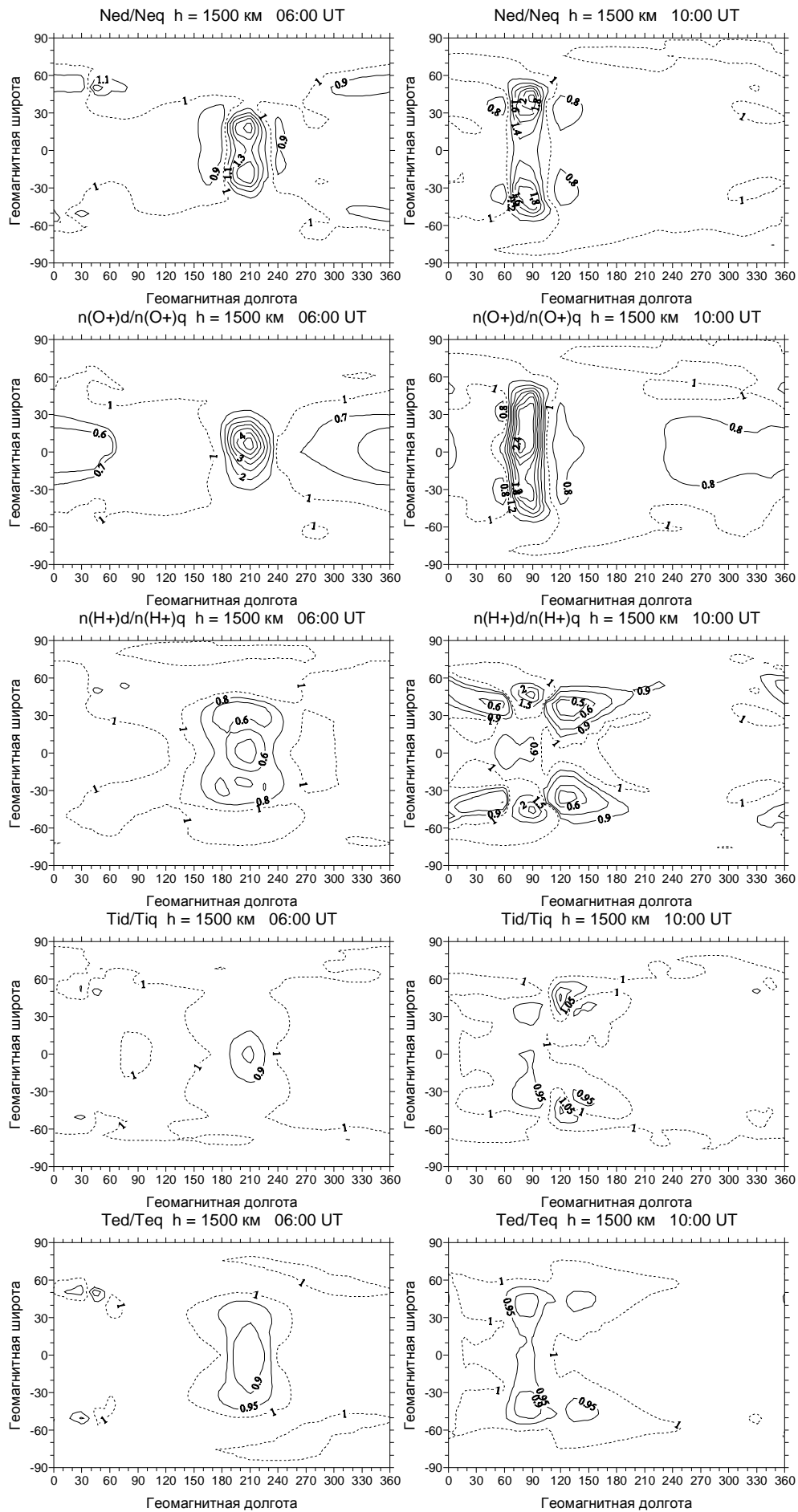


Рис. 2

Концентрация ионов H^+ падает за счет того, что на больших высотах под действием восточного электрического поля тепловые протоны дрейфуют в сторону больших значений L -параметра, то есть из плазменных трубок меньшего объема в трубки большего объема, что и приводит к падению концентрации ионов H^+ на высоте 1500 км.

Ионная и электронная температуры во время землетрясения в Ванимо ведут себя похожим образом. На геомагнитном экваторе формируются области пониженных значений температур на ~20% для ионов и на ~10% для электронов, которые простираются до эпицентральной и магнитно-сопряженной точек. При землетрясении в Риме формируются области отрицательных возмущений в плазменных температурах, локализованные вблизи эпицентральной и магнитно-сопряженной точек, в которых значения температур падают на ~5-10%. Помимо этого в распределении ионной температуры к востоку и в сторону полюсов от этих областей формируются области повышенных на ~10% значений ионной температуры.

Поскольку концентрации электронов и ионов O^+ на высоте 1500 км в преддверии землетрясения растут, а концентрация ионов H^+ падает, то из этого следует, что в рассматриваемых условиях на высоте 1500 км ион H^+ является второстепенным ионом, а O^+ – главным. Поэтому основной вклад в температуру ионов дают ионы O^+ . А при постоянных источниках нагрева тепловых электронов и атомарных ионов их температуры падают с ростом концентрации электронов и основных атомарных ионов из-за того, что энергия источников подводится к большему числу частиц.

В работах [15, 21] отмечалось изменение ионного состава внешней ионосферы перед сильными землетрясениями. Наши расчеты показали, что учет сейсмогенных источников восточного электрического поля также приводит к изменению ионного состава внешней ионосферы, которое согласуется с наблюдениями. Кроме того, показано, что в преддверии землетрясений происходит падение плазменных температур во внешней ионосфере, что также может служить предвестником будущего землетрясения.

Список литературы

1. Гальперин Ю.И., Джапаридзе Г.А., Джорджио Н.В. Эффекты сильных землетрясений в верхней ионосфере, выявленные с помощью искусственного спутника Земли “Ореол-3” // Тр. Тбил. ун-та. 1992. Т. 313. С. 57-72.
2. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Калининград, РГУ им. И.Канта. 2007. – 146 с.
3. Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Постановка задачи и тестовые расчеты // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 3. С. 77-92.
4. Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 485-494.
5. Ларкина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В. Сравнительный анализ электромагнитных эффектов над зонами тектонических разломов // Докл. РАН. 2001. Т. 376, № 4. С. 532-538.
6. Молчанов В.Н. Вариации электрического и магнитного полей – предвестники землетрясений // Краткосрочные предвестники землетрясений и чрезвычайных ситуаций: Матер. 2 межрегион. симпозиума. Санкт-Петербург, 27-29 сент. 2001. – СПб.: Изд. Русс. геогр. Общества. 2001. С. 32.
7. Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Формирование ионосферных предвестников землетрясений электрическим полем // Статья в этом сборнике. 2007.

8. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1990. Т. 30, № 4. С. 612-619.
9. Намгаладзе А.А. О возможных физических механизмах формирования ионосферных предвестников землетрясений // *Материалы Международной Научно-технической конференции МГТУ «Наука и образование-2007»*. 2007.
10. Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. Т. 42, № 6. С. 821-830.
11. Сорокин В.М., Ященко А.К. Возмущение квазистационарного электрического поля в ионосфере над сейсмоактивными районами // *Хим. физ.* 2000. Т. 19, № 6. С. 71-80.
12. Gousheva M., Glavcheva R., Danov D., Angelov P., Hristov P. Influence of earthquakes on the electric field disturbances in the ionosphere on board of “Intercosmos-Bulgaria-1300” satellite // *Докл. Българ. АН*. 2005. V.58, No. 8. P. 911-916.
13. Grimalsky V.V., Hayakawa M., Ivchenko V.N., Rapoport Y.G., Zadorozhnii V.I. Penetration of an electrostatic field from the lithosphere into ionosphere and its effect on the D-region before earthquakes // *J. Atmos. And Sol.-Terr. Phys.* 2003. V. 65, No. 4. P. 391-407.
14. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Forster M., et al.: Calculated and observed ionospheric parameters for a Magion 2 passage and EISCAT data on June 31, 1990 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 14697-14710.
15. Larkina V.I. Response of the plasmasphere to earthquakes // *Тез. докл. Междунар. симп. “Спутников. исслед. ионосфер. и магнитосфер. процессов”*. 1995. – М. : С. 32-33.
16. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure and Applied Geophysics*. 1988. V. 127, No. 2/3. P. 219-254.
17. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1991. V. 53, No. 11/12. P. 1113-1124.
18. Namgaladze A.A., Shagimuratov I.I., Zakharenkova I.E., Martynenko O.V., Zolotov O.V. Possible physical mechanisms of the TEC enhancements observed before earthquakes// *IUGG Abstracts*. 2007.
19. Pong Zi-zheng, Niu Zhi-ren. Electric potential and apparent resistivity in rocks containing non-uniformly disturbed cracks// *Acta seismol. Sin.* 2001. V. 14, No. 3. P. 315-324.
20. Rapoport Y., Grimalsky V., Hayakawa M., Ivchenko V., Juarez R.D., Koshevaya S., Gotynyan O. Change of ionospheric plasma parameters under the influence of electric field which has ionospheric origin and due to radon emanation// *Phys. And Chem. Earth*. 2004. V. 29, No. 4-9. P. 579-587.
21. Shklyar D.R., Truhlik V. On the modification of light ion concentration profiles above seismically active regions: a qualitative consideration // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 1998. V. 60, No. 10. P. 1025-1033.
22. Skordas Efthimios, Kapiris Panayiotis, Bogris Nikos, Varotsos Panayiotis. Field experimentation on the detectability of co-seismic electric signals // *Proc. Japan Acad. B*. 2000. V. 76, No. 4. P. 51-56.
23. Tzani Andreas, Vallianatos Filippov. A critical review of electric earthquake precursors// *Ann. Geofis.* 2001. V. 44, No. 2. P. 429-460.
24. Vallianatos F., Tranis A. On possible scaling laws between electric earthquake precursors (EEP) and earthquake magnitude // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, No. 13. P. 2013-2016.
25. Varotsos Panayiotis. A review and analysis of electromagnetic precursory phenomena // *Acta geophys. pol.* 2001. V.49, No. 1. P. 1-42.