

### Список литературы

1. Ананьин И.В., Мерзлый А.М., Сорокин Л.В. Сопоставление временных и пространственных параметров сильных землетрясений с авиационными происшествиями // Атлас временных вариаций природных и антропогенных процессов. Т. 3. –Москва.: Янус-К, 2002. С. 278 – 281.
2. Морозова Л.И. Тектонические процессы в период Корякского землетрясения 21 апреля 2006 г. // Современные проблемы регионального развития. Хабаровск. ДВО РАН, 2006. С. 113 – 115.
3. Морозова Л.И. Особенности проявления лито-атмосферных связей в периоды сильных землетрясений Азии // Физика Земли. 1996. № 5. С. 63-68.
4. Морозова Л.И. Спутниковые метеорологические снимки как носители информации о сейсмических процессах // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 136 – 140.
5. Морозова Л.И. Тайфуны и сейсмичность // Докл. РАН. 2006. Т. 410. № 3. С. 397 – 400.
6. Моргунов В.А., Шахраманьян М.А. Задачи оперативного прогноза землетрясений // Докл. РАН. 1996. Т. 349, № 6. С. 818 - 821.
7. <http://www.ceme.gsras.ru>.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

### FORMATION OF IONOSPHERIC EARTHQUAKE PRECURSORS BY ELECTRIC FIELD

*А.А. Намгаладзе<sup>1</sup>, М.В. Клименко<sup>2</sup>, В.В. Клименко<sup>3</sup>, И.Е. Захаренкова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Мурманский государственный технический университет,*

<sup>2</sup>*Калининградский государственный технический университет,*

<sup>3</sup>*Западное Отделение ИЗМИРАН*

A physical mechanism has been proposed for the forming of areas of increased or decreased total electron content (*TEC*) in the ionosphere as observed by the measurements of the GPS signal delays before strong earthquakes. The main cause of these *TEC* disturbances is the vertical plasma transport under the action of the zonal electric field directed eastward in cases of the positive *TEC* disturbances at midlatitudes and in cases of deepening of the F2-region equatorial anomaly minimum. The spatial potential pattern for such electric field was proposed. For the eastward electric field existence at the near-epicentral region it is necessary, that the positive electric charges were located at the western boundary of this region, and the negative charges at the eastern boundary. To investigate an efficiency of the proposed mechanism the numerical model calculations were performed. The ionosphere reaction to the action of the electric field created by such configuration of electric charges was calculated. The numerical calculation results revealed an excellent agreement with the *TEC* observations before strong earthquakes at mid- and low latitudes.

Поиски ионосферных предвестников землетрясений ведутся в течение последних двух десятилетий (см. ссылки в работе [3]). Широкое применение для исследования ионосферных эффектов сейсмической активности нашло использование системы спутников GPS и сети приёмников радиосигналов этих спутников [11; 17]. С помощью измерений временных задержек этих сигналов можно осуществлять картирование *TEC* и изучать его временную эволюцию.

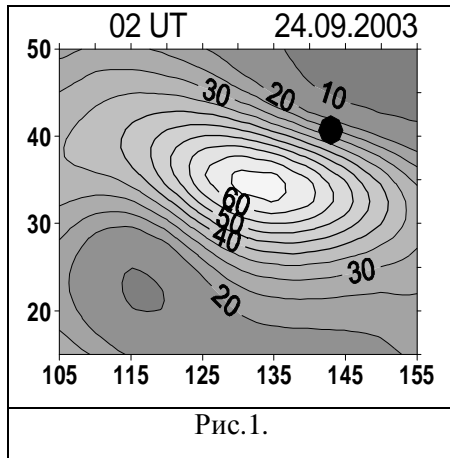


Рис.1.

может достигать  $-30\%$  относительно невозмущенных значений [8]. В спокойных геомагнитных условиях смена знака сейсмо-ионосферного возмущения может трактоваться как сигнал приближающегося землетрясения.

На рис.1 показано характерное возмущение *TEC*, наблюдавшееся перед среднеширотным землетрясением 25 сентября 2003 г. в Японии [3].

Перед сильными приэкваториальными землетрясениями их предвестниками являются углубление и расширение минимума электронной концентрации над магнитным экватором в дневное время и смещение гребней аномалии [9; 2; 17]. На рис.2 показана сейсмогенная экваториальная аномалия (черные кружки) в ионосфере за день до землетрясения в Чили 12.04.1963 по данным спутника Alouette-2. Другими линиями показаны вариации  $foF_2$  в невозмущенное время (до и после землетрясения). EQ – положение эпицентра (16).

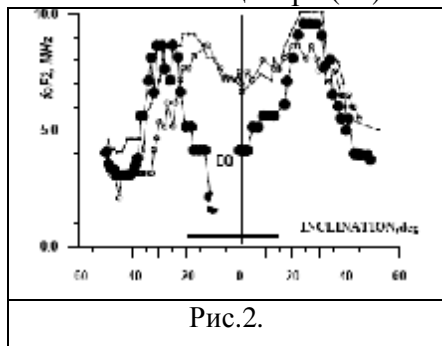


Рис.2.

В работах [3; 17] показано, что для сильных среднеширотных землетрясений эффекты в *TEC* имеет вид локального увеличения электронной концентрации, которое наблюдается за 2-3 суток до землетрясения, причем максимум возмущений расположен в непосредственной близости от эпицентрального района. Область занимает несколько тысяч километров по долготе и около 1000 км по широте. По мере приближения к началу землетрясения амплитуда возмущения увеличивается до 40-100% относительно фонового уровня. За 10-30 час. до землетрясения электронная концентрация над эпицентральной областью уменьшается. Величина "отрицательного" эффекта

Физическая интерпретация формирования ионосферных предвестников землетрясений предложена в работах [10; 15] и базируется на гипотезе о сейсмогенном электрическом поле амплитудой от единиц до десятков мВ/м (12). В пользу этой гипотезы говорят магнитная сопряженность ионосферных предвестников [14] и упомянутые эффекты в экваториальной аномалии [9; 17].

В работе [6] был проведен анализ возможных физических механизмов формирования возмущений *TEC* с характерными для предвестников пространственно-временными масштабами и было высказано предположение, что главной причиной возникновения областей повышенного (пониженного) *TEC* в ионосфере, наблюдаемых с использованием измерений задержек сигналов спутников GPS перед сильными землетрясениями [3], является вертикальный перенос плазмы F2-области ионосферы вверх (вниз) под действием восточного (западного) электрического поля.

В средних широтах вертикальная составляющая электромагнитного дрейфа, создаваемая восточным полем и направленная вверх, приводит к увеличению  $N_mF_2$  за счёт переноса плазмы на большие высоты с меньшей скоростью потерь [1]. Западное поле вызывает отрицательный эффект в  $N_mF_2$ . В низких широтах усиление восточного поля углубляет провал над магнитным экватором в широтном ходе электронной концентрации за счёт усиления фонтан-эффекта.

Для существования восточного электрического поля в околоэпицентральной области необходимо, чтобы на западной границе этой области были расположены положительные электрические заряды, а на восточной – отрицательные.

Для проверки высказанной гипотезы и выяснения эффективности предложенного механизма в данной работе выполнены модельные расчёты реакции ионосферы на

действие электрического поля, создаваемого такой конфигурацией зарядов в окрестности эпицентра землетрясения для случаев среднеширотных и приэкваториальных землетрясений.

Расчёты проводились с использованием глобальной численной модели [13, 7], модифицированной в части решения уравнения для электрического потенциала [4, 5]. Анализ результатов модельных расчётов проводился на основе сопоставления глобальных карт распределения различных ионосферных параметров, полученных без дополнительных и с дополнительными, предположительно сейсмогенными, источниками электрического поля.

За невозмущённое состояние принят магнитно-спокойный день весеннего равноденствия при низкой солнечной активности. Возмущённое состояние, предвещающее сильное землетрясение, моделировалось включением дополнительных источников электрического поля.

Эти источники включались и не изменялись в течение 24 часов в виде дополнительных положительных и отрицательных потенциалов в 5 кВ (в случае низкоширотного источника) и 10 кВ (в случае среднеширотного источника) на западной и восточной границах околоэпицентральных областей, соответственно. Дополнительные потенциалы добавлялись в моделирующее уравнение для расчета глобального распределения потенциала спокойного магнитосферного и динамо поля, которое затем интегрировалось с учетом этих дополнительных источников.

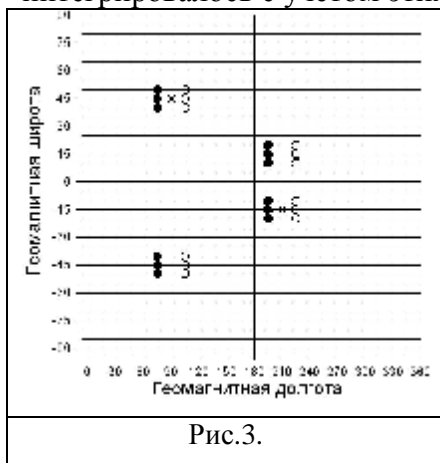
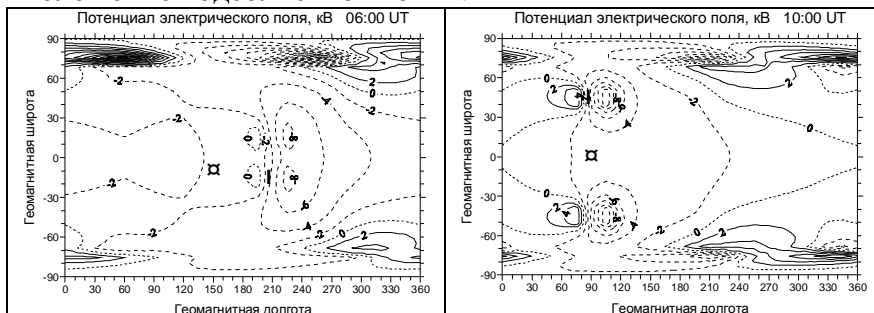


Рис.3.

Были рассмотрены 2 околоэпицентральных области размерами  $10^\circ$  по широте и  $30^\circ$  по долготе с эпицентрами в точках с магнитными координатами ( $\Phi = 45^\circ$ ,  $\Lambda = 90^\circ$ ) – Рим и ( $\Phi = -15^\circ$ ,  $\Lambda = 210^\circ$ ) – Ванимо. Эти размеры примерно соответствуют размерам областей повышенных значений *TEC*, обнаруженных в [3].

На рис.3 показана используемая в модельных расчётах геомагнитная координатная разностная сетка и отмечены темными и светлыми кружками узлы, в которых задавались дополнительные положительные и отрицательные потенциалы, соответственно.

Расчитанные глобальные распределения потенциала и векторов электрического поля показаны в геомагнитных координатах на рис. 4 и 5 для случаев приэкваториального (слева сверху) и среднеширотного (справа сверху) источников. Внизу для сравнения показаны распределения соответствующих параметров без дополнительных источников. Чёрными кружками отмечены положения эпицентров землетрясений, кружком с точкой отмечено положение подсолнечной точки.



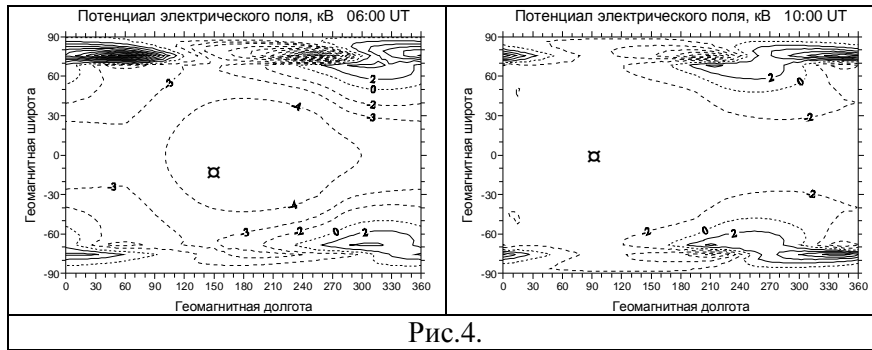


Рис.4.

дополнительных полей заметно превосходят невозмущённые значения как в случае приэква-ториального источника (усиление поля в Ванимо от 0.2 мВ/м до 2-3.5 мВ/м), так и в случае среднеширотного источника (возрастание поля в Риме от ~1 мВ/м до ~3-9 мВ/м), оставаясь, однако, существенно меньшими спокойных высокоширотных электрических полей магнитосферного происхождения (~15-25 мВ/м, см. рис.5).

На рис. 6 и 7 показаны рассчитанные глобальные распределения критических частот  $foF2$  и  $TEC$  при дополнительных среднеширотных (вверху) и приэкваториальных (посередине) источниках и в их отсутствие (внизу) для моментов времени 03 UT, 08 UT и 23 UT. В 03 UT среднеширотный источник находится на ночной стороне, а экваториальный на дневной. В 08 UT среднеширотный источник находится на освещённой утренней стороне, а экваториальный на освещённой вечерней стороне. В 23 UT среднеширотный источник находится на ночной стороне, а экваториальный в раннем утреннем секторе.

Действие приэкваториального источника усиливает экваториальную аномалию F2-слоя в околоэпицентральной области, углубляя минимум  $foF2$  над экватором и отодвигая гребни аномалии от экватора к средним широтам. Такое поведение полностью согласуется с наблюдениями спутника Alouette-2 за день до землетрясения в Чили 12.04.1963 (см. рис.2).

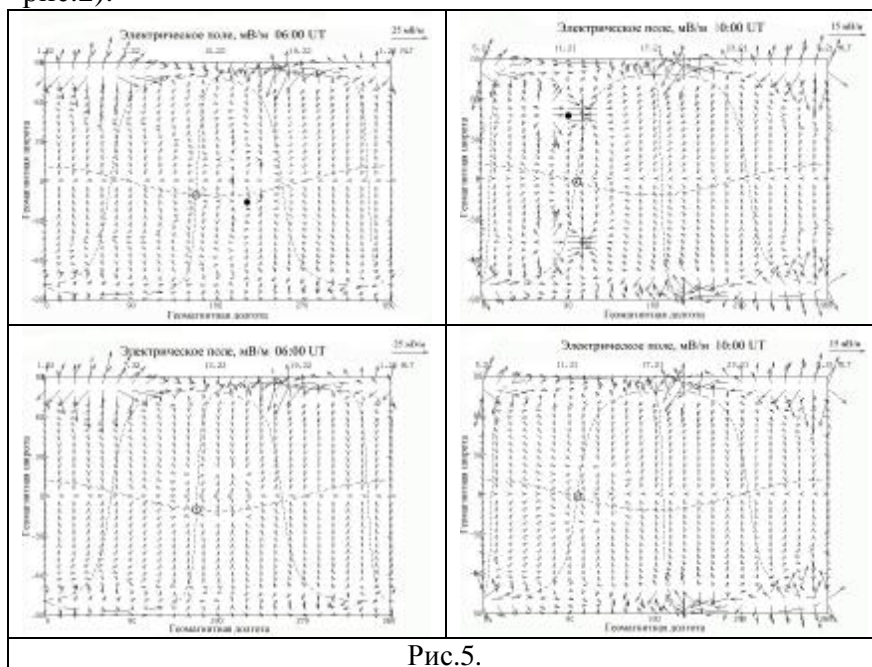


Рис.5.

В ночное время наличие источника не вызывает заметных эффектов. Они появляются после восхода и сохраняются после захода. Величина электрического поля среднеширотного источника получается большей, а эффекты слабее, чем в низких широтах.

Из рисунков видны области восточного электрического поля над предполагаемыми эпицентрами будущих землетрясений и магнитно-сопряжённые с ними области в противоположных полушариях. Величины

Действие среднеширотного источника приводит к повышению  $foF2$  и  $TEC$  в околоэпицентральных областях, если они освещены Солнцем. Величина повышений и их пространственные масштабы совпадают с характеристиками предвестников, обнаруженных в  $TEC$  [3].

В ночное время наличие источника не вызывает заметных эффектов. Они появляются после восхода и сохраняются после захода.

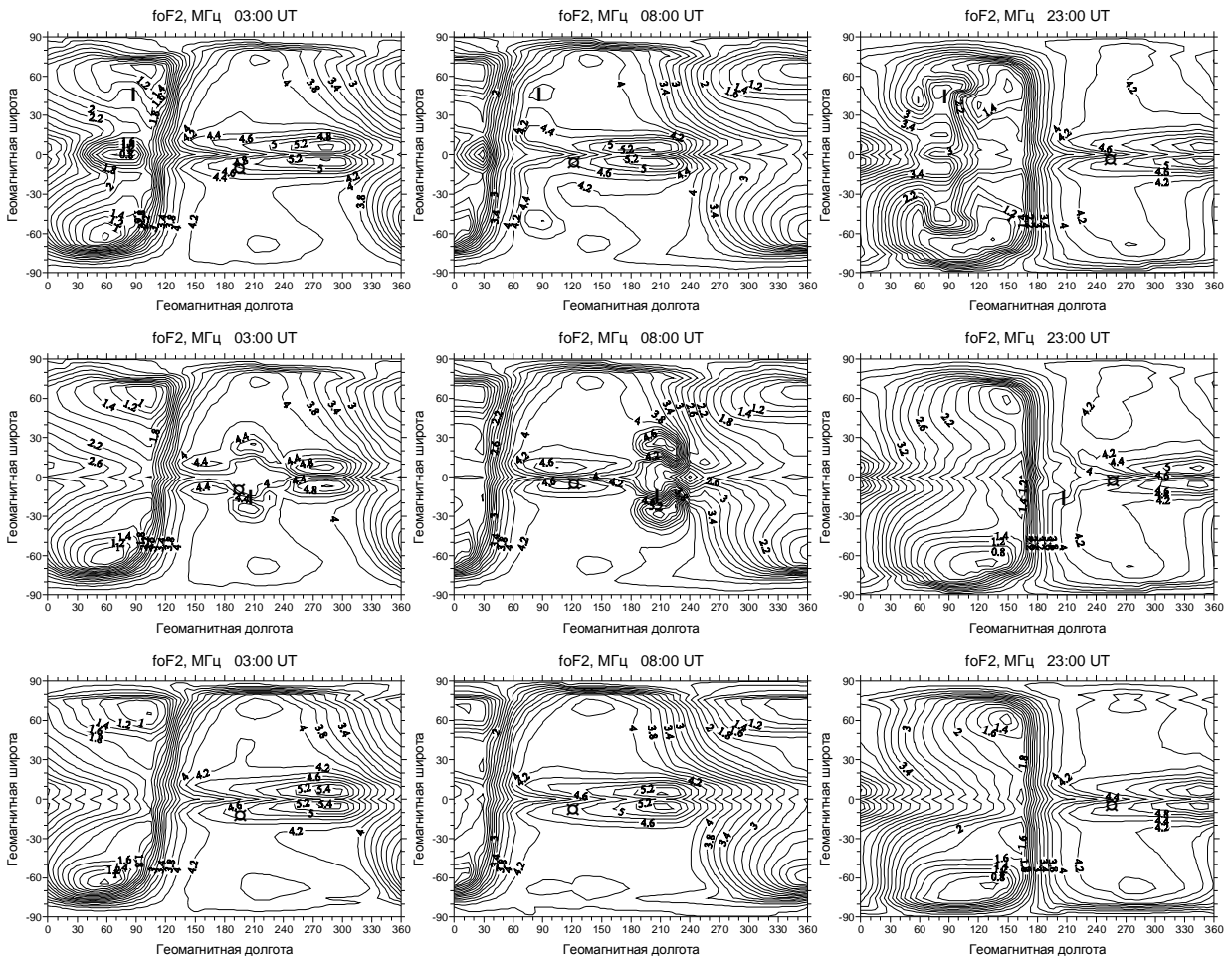
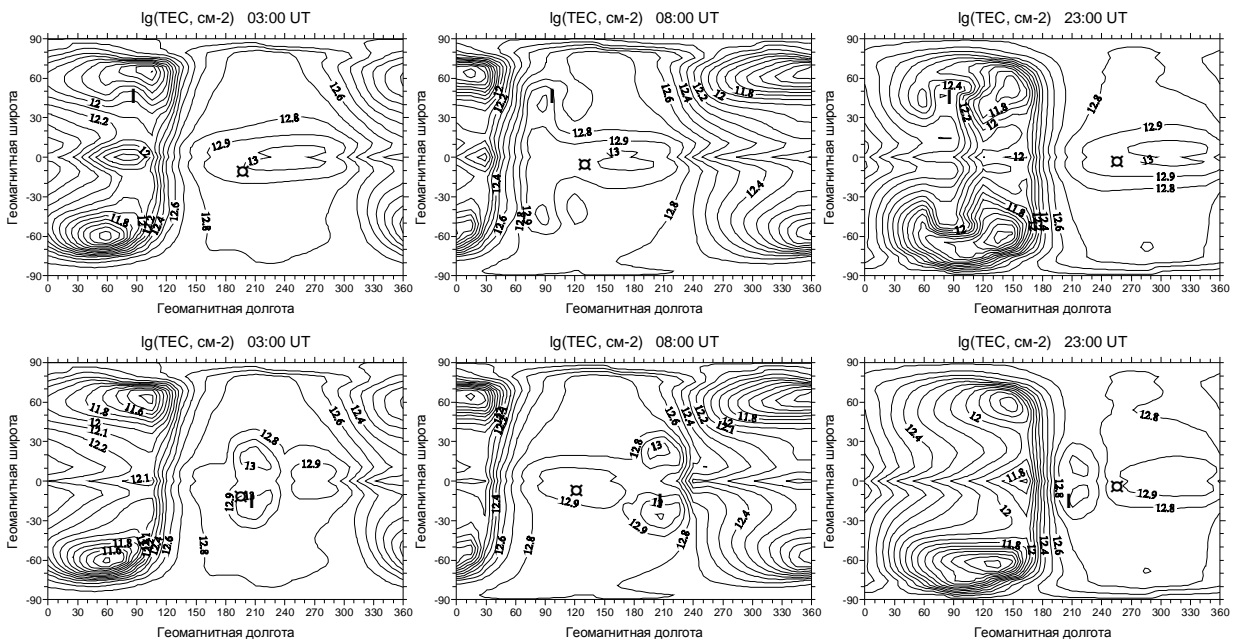


Рис.6.

Помимо эффектов в электронной концентрации в F2 слое и в  $TEC$  действие обоих источников проявляется в виде отчётливых эффектов практически во всех моделируемых ионосферных параметрах и, в особенности, в экваториальном электроджете (см. рис.8).



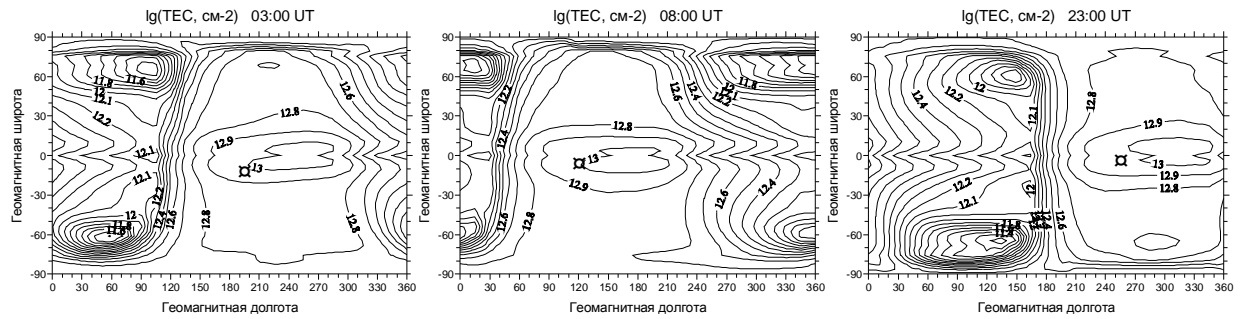


Рис.7.

Полученные в модельных расчётах эффекты в  $foF2$  и  $TEC$  в околоэпицентральных областях, вызванные модельными сейсмогенными источниками электрического поля, очень похожи на экспериментально наблюдавшиеся эффекты перед сильными землетрясениями в низких и средних широтах. Это указывает на правильный выбор дополнительных потенциалов. Варьируя их расположение и величину, можно добиться большего сходства с наблюдаемыми ионосферными предвестниками землетрясений.

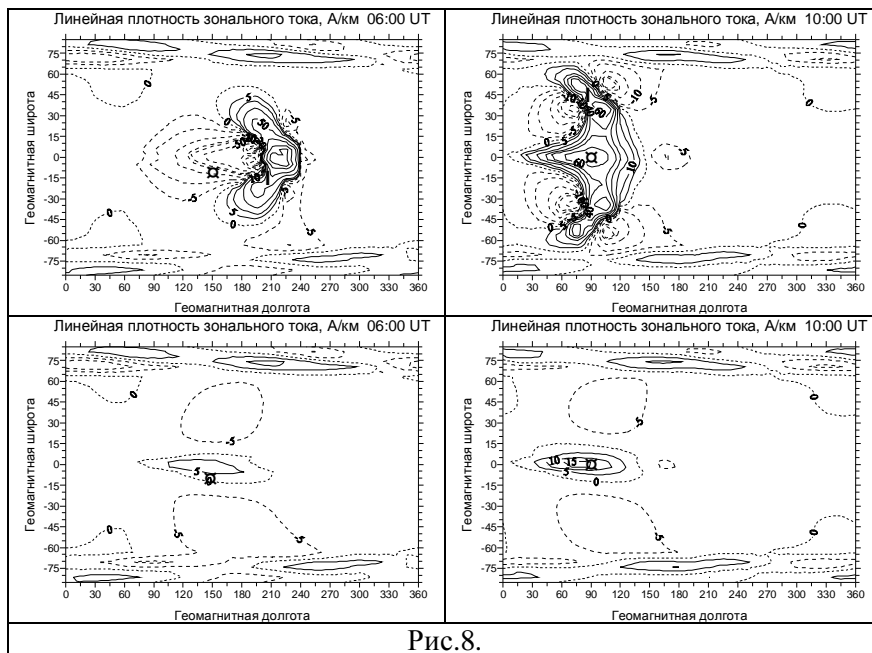


Рис.8.

Согласие полученных результатов расчетов с наблюдениями убедительно свидетельствуют в пользу гипотезы о зональных электрических полях, появляющихся в околоэпицентральных областях за несколько суток до землетрясений и вызывающих локальные изменения  $TEC$  в средних широтах и экваториальной аномалии.

Работа поддержана грантом РФФИ №05-05-97511.

#### Список литературы

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. –526с.
2. Депенева А.Х., Михайлов А.В., Деви М., Барбара А.К. Пространственные и временные вариации критических частот области F ионосферы над зоной подготовки экваториального землетрясения // Геомагнетизм и аэрномия. Т.47. №1. С.138-142. 2007.
3. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук, Калининград, РГУ им. И.Канта. 146 стр. 2007.
4. Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Постановка задачи и тестовые расчеты // Математическое моделирование. Т.18. №3. С.77-92. 2006.
5. 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 аэрномия. Т.46. №4. С.485-494. 2006.
6. Намгаладзе А.А. О возможных физических механизмах формирования ионосферных предвестников землетрясений // Мат. Междунар. науч.-тех. конф. МГТУ «Наука и образование-2007». 2007.

7. Намгаладзе А.А., Ю.Н.Кореньков, В.В.Клименко, И.В.Карпов, Ф.С.Бессараб, В.А.Суроткин, Т.А.Глущенко, Н.М.Наумова. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэронаука. Т.30. №4. С.612-619. 1990.
8. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. 1998. Т.168, №5. С.582-589.
9. Пулинец С.А., Легенька А.Д. Динамика приэкваториальной ионосферы в период подготовки сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэронаука. 2002. Т.42. №2. С.239-244.
10. Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэронаука. 2002. Т.42. №6. С.821-830.
11. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // Rus. J. Earth Sci. 2004. V.6, №5. P.339-354.
12. Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Stanev G.A. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake center // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989.V.57. P.110-114.
13. 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 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1991. V.53. №11/12. P.1113-1124.
14. Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2003. V.65. P.1337-1347.
15. Pulinets S.A. and Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, Berlin, Germany. 2004. 315p.
16. Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh. Seismoprecursors in Space as Plasma and Wave Anomalies // J. Atmosph. Electr. 1996. V.16. №3. P.251-288.
17. Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I. Modification of the low-latitude ionosphere before December 26, 2004 Indonesian earthquake // Nat. Hazards and Earth System Sci. 2006. V.6. P.817-823.

## **КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ НИЗКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

### **SPACE MONITORING OF LOW ENERGY ELECTRON FLUXES WITH THE PURPOSE OF EARTHQUAKE FORECAST**

***В.М. Панков, О.Л. Вайсберг, Е.Н. Евланов, А.А. Гусев, В.Н. Смирнов,  
Г.И. Пугачева, Н.С. Ерохин***

*Институт космических исследований РАН*

We give a detailed analysis of early performed space experiments directed to the search of earthquake precursors by satellite equipment. New suggestions of the space experiments devoted to global space monitoring of low energy electron fluxes at the satellite orbit with the purpose of elaboration of earthquake forecasting modern methods are described.

#### **Введение**

Одной из наиболее важных проблем современной геофизики является проблема прогноза землетрясений. Традиционный сейсмический мониторинг, существующий уже около 150 лет, пока не привел к выработке методов достоверного прогноза землетрясений. В то же время развитие космической геофизики, использующей космические аппараты (КА) для исследования разнообразных природных явлений в атмосфере и на поверхности Земли (цунами, циклоны, молнии, землетрясения, и др.), открывают перспективу для поиска в ближнем космосе физических эффектов, способных служить надежными