

Возмущения полного электронного содержания ионосферы над республикой Кыргызстан перед сильным землетрясением 31.12.2007г.

А.В. Тертышников¹, И.Е. Захаренкова², В.О. Скрипачев¹,
И.В. Суровцева¹, А.М. Падохин³

¹ Научно-технологический центр космического мониторинга Земли
ФГУП «РНИИ КП»,
E-mail: skripatchevv@inbox.ru

² Западное Отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Калининград
E-mail: zakharenkova@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
E-mail: padokhin@mail.ru

В исследованиях предвестниковых возмущений ионосферы перед сильными землетрясениями используются сигналы навигационных космических аппаратов (НКА), по характеристикам которых диагностируется состояние ионосферы вдоль трассы распространения сигнала и исследуется морфология возмущений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. В работе рассмотрены предвестниковые сейсмогенные возмущения ПЭС над республикой Кыргызстан в период сильной сейсмической активности 27.12.07-01.01.08. При расчетах ПЭС использовались данные наземных GPS станций: Бишкек и Талас. Продемонстрирована возможность применения технологии локации возмущений ионосферы сигналами с НКА при диагностике предвестников сильного землетрясения над республикой Кыргызстан.

Ключевые слова: возмущения ионосферы, сигналы навигационных космических аппаратов, полное электронное содержание, станции ионосферного зондирования, сейсмический мониторинг, землетрясения.

В последние годы в исследованиях предвестниковых возмущений ионосферы перед землетрясениями активно используются сигналы навигационных космических аппаратов (НКА) американской спутниковой навигационной системы – GPS (Global Position System или «NAVSTAR»). По характеристикам принятых сигналов НКА диагностируется состояние ионосферы и тропосферы вдоль трассы распространения сигнала, исследуется морфология возмущений полного электронного содержания (ПЭС) атмосферы. Отметим, что ПЭС является основной характеристикой ионосферы, определяющей изменение параметров проходящей радиоволны [1].

По данным о ПЭС над многими сейсмоопасными регионами обнаружены аномальные возмущения ионосферы перед сильными землетрясениями. Эволюция этих возмущений соответствует результатам исследований с наземных станций ионосферного зондирования. Так, в [2] над Грецией по четырем станциям, расположенным в радиусе до 1000 км от эпицентра сильного землетрясения 8 января 2006г. (магнитуда $M=6.8$), выявлено значительное изменение ПЭС за сутки до землетрясения (рис. 1).

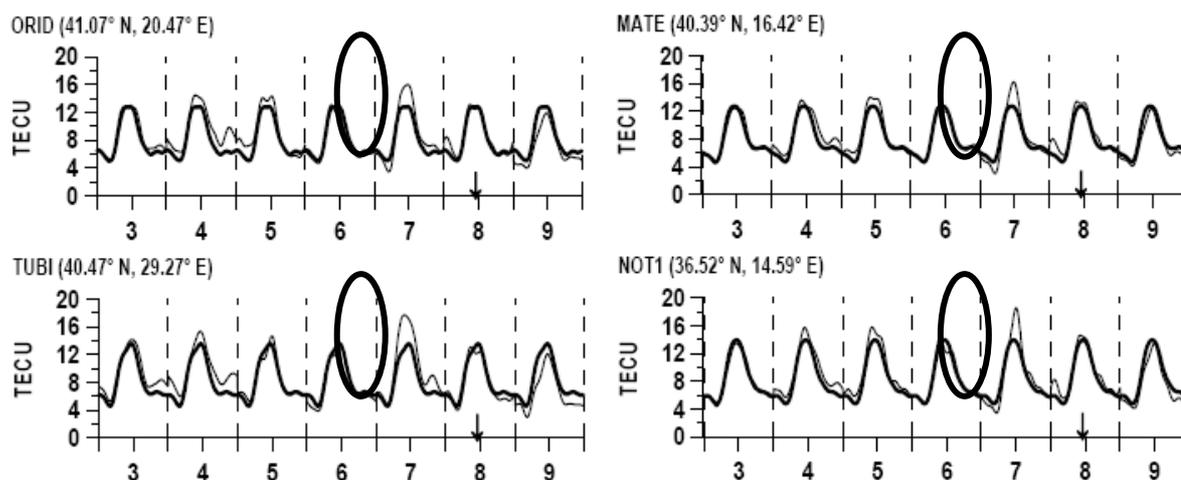


Рис. 1. Вариации ПЭС для европейских станций ORID, TUBI, MATE и NOT1 за период 3-9 января 2006г. Тонкая линия – текущая вариация ПЭС, толстая линия – среднее значение. Стрелкой отмечен момент землетрясения [2]

Для исследования морфологии возмущений ПЭС над Грецией в [2] использовались глобальные ПЭС карты, построенные в формате IONEX [1, 3], с двухчасовым интервалом и разрешением 5° по долготе и 2.5° по широте. Значения полного электронного содержания за текущий день сравнивались с фоновыми ПЭС картами. В качестве фоновых использовались усредненные за рассматриваемый период значения ПЭС.

Карты в формате IONEX хранятся в архивах в IGS (International GPS Service for Geodynamics), куда они поступают от национальных агентств в соответствии с регламентами обеспечения работоспособности глобальной навигационной системы GNSS (Global Navigation Satellite System) [4, 5]. IGS представляет собой лишь один из десятка сервисов IAG (International Association of Geodesy: <http://www.iag-aig.org/>), объединяющей службы лазерной локации, вращения Земли, изучения приливов и уровня моря, гравитационного поля и геоида, измерения времени и др.

В [2] исследована морфология возмущений ПЭС над сейсмоактивным регионом. Возмущения ПЭС проявились в формировании малоподвижной области повышенных значений ПЭС. Максимум области располагается в непосредственной близости от эпицентра землетрясения. Амплитуда возмущения достигает $\sim 50\%$ от фоновых значений. Аномалия имеет четко выраженный локальный характер, в течение рассматриваемого периода времени область максимального возмущения располагается в районе эпицентра будущего землетрясения. Область значительного повышения ПЭС имеет размеры около 4000 км по долготе и 1500 км по широте. Надо учесть, что низкое разрешение карт в формате IONEX сгладило детали возмущения ПЭС, выявляемых при радиотомографических исследованиях ионосферы.

Другой пример проявления возмущений ПЭС перед сильным землетрясением представлен, например, в [6] над Калининградом (Россия), недалеко от которого 21 сентября 2004 года произошло 2 землетрясения с магнитудами $M=4,8$ и $M=5$. Оба землетрясения наблюдались практически в одном месте с интервалом в 2,5 часа (11:05:04 UTC и 13:32:31 UTC). Эпицентры землетрясений соответствовали 54.9 с.ш., 20.1 в.д. и 54.7 с.ш., 20.1 в.д. Эти землетрясения произошли в зоне, не являющейся сейсмоактивной.

На рис. 2 из [6] приведены высотные профили распределения электронной концентрации, полученные по наблюдениям GPS спутника № 26 с наземной станции RIGA. Минимальное удаление проекции его орбиты от эпицентра землетрясения было около 290 км. Радиотрасса до станции Рига пересекала с юго-запада-юга эпицентральную зону землетрясений.

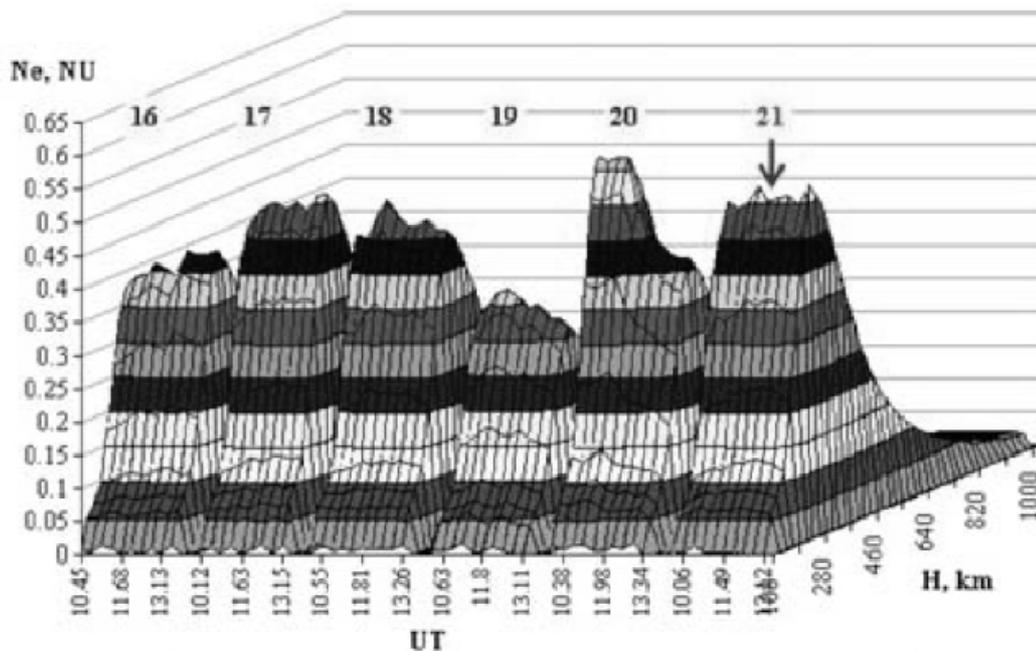


Рис. 2. Профили электронной концентрации в период 16-21 сентября 2004 года (RIGA, спутник № 26) [6]

За двое суток до землетрясения значение максимума электронной концентрации в F2 слое ионосферы заметно уменьшилось, затем начался рост электронной концентрации. Накануне землетрясений зафиксировано аномальное увеличение ПЭС. Причем, по наземным данным зондирования ионосферы размер сейсмо-модифицированной области в ионосфере в период подготовки сильного землетрясения достигает порядка 20° - 30° в диаметре [6, 7]. Она не стационарна, и после формирования начинает движение со скоростью в несколько сотен км/ч ортогонально к ближайшей к эпицентру границе литосферной плиты [8].

Физически подобные ионосферные аномалии пытаются объяснить электрическими полями сеймотектонической аномалии. Они фиксировались с КА над сейсмоопасными регионами перед сильными землетрясениями.

Диагностика возмущений ПЭС представляет интерес для совершенствования региональных систем сейсмического мониторинга. Например, для системы сейсмического мониторинга республики Кыргызстан, с достаточно развитой системой пунктов наземного сейсмического мониторинга. Для этого необходимы архивы морфологии возмущений ПЭС и предварительная их диагностика.

В данной работе для диагностики предвестниковых сейсмогенных возмущений ПЭС над республикой Кыргызстан было использовано сильное коровое землетрясение региона 31.12.2007г. (~ 23ч 10-21 мин. по местному времени, широта эпицентра $40,29^{\circ}$ с.ш., долгота $72,99^{\circ}$ в.д., глубина гипоцентра $z=6$ км, $M=5,8$). Положение станций приема сигналов НКА GPS и эпицентральной зоны землетрясения представлено на рис. 3.

Следует отметить, что 26.12.2007г. произошло еще одно землетрясение, вызвавшее значительные разрушения. Информация прошла по новостным лентам различных информационных агентств, но это землетрясение не было обозначено в каталогах международной службы геодвижений.

Оценки ПЭС в эксперименте рассчитывались в соответствии с известными методиками [1] по архивным данным IGS о характеристиках сигналов GPS КА. Результаты расчетов оценок ПЭС по станции Талас (TALA) и Бишкек (POL2) с учетом баллистических характеристик НКА для сейсмоопасного периода времени представлено на рис. 4.

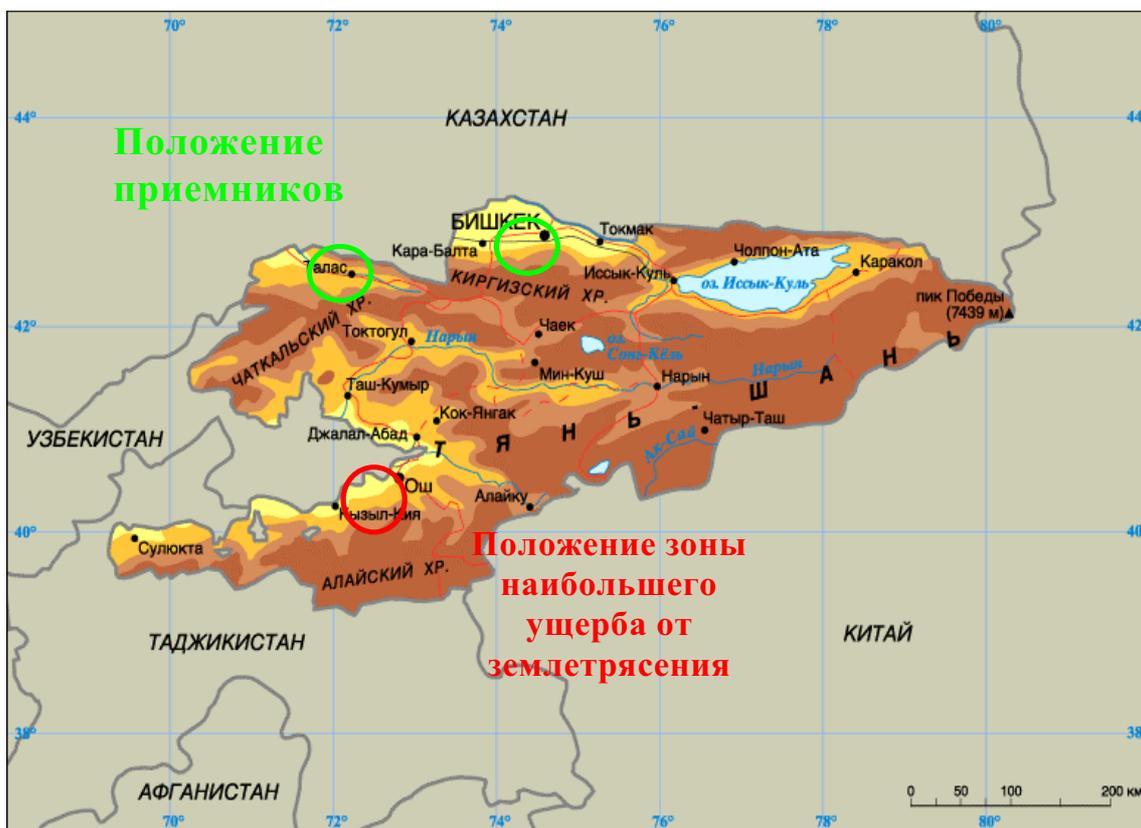


Рис. 3. Положение приемников и эпицентральной зоны землетрясения 31.12.2007г. над республикой Кыргызстан

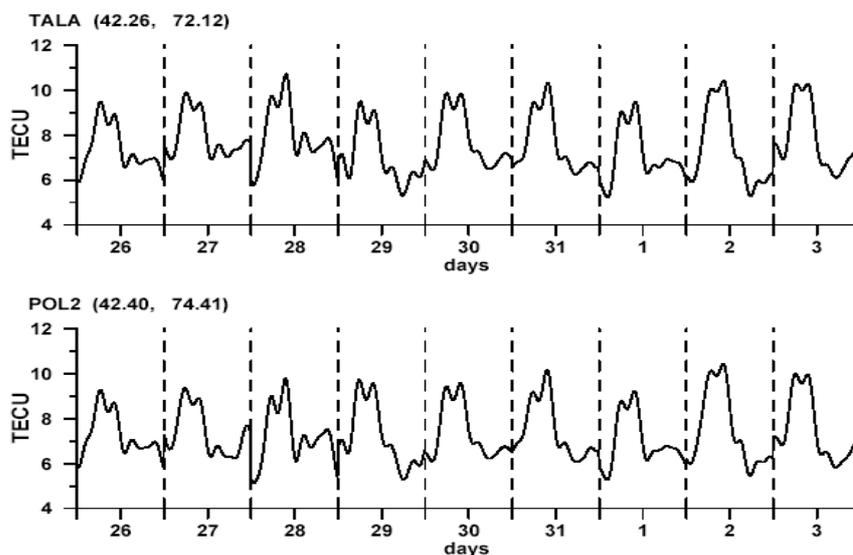


Рис. 4. Изменение оценок ПЭС по станции Талас и Бишкек

За сутки-трое до землетрясения на представленных графиках проявляются минимальные ночные значения ПЭС, что соответствует результатам исследований сейсмоионосферных эффектов [9, 10] с помощью наземных станций ионосферного зондирования.

Солнечная активность в указанный интервал времени была низкой. Вспышек не отмечалось. Данные наблюдений за вариациями индексов геомагнитной активности Кр и Dst с 19.12.2007г. по 3.01.2008г. приведены на рис. 5 [11].

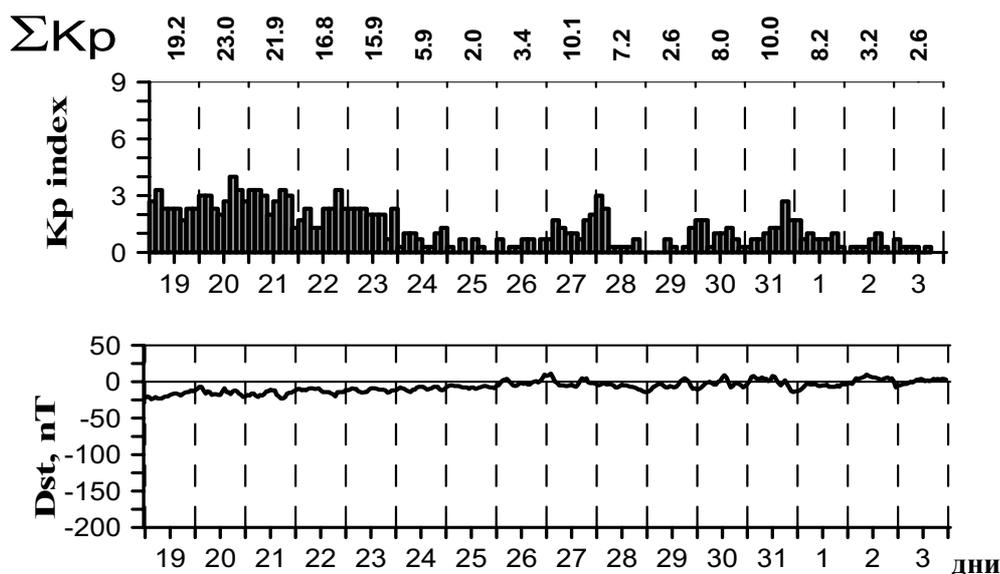


Рис. 5. Вариации индексов геомагнитной активности Kp и Dst с 19.12.2007г. по 3.01.2008 г.

Отклонение среднесуточной вариации ПЭС от общей средней на отрезке в несколько суток до землетрясения не превышало 5-6%, что является малой величиной, так как нормальная вариабельность среднеширотной ионосферы оценивается в $\pm 25\%$. Во внутрисуточных вариациях оценок ПЭС, рассчитанных без учета угла наклона видимых НКА, 31.12.2007 г. проявилась четырехчасовая положительная аномалия ПЭС, превышающая фон более чем в 1,5 раза со значительными вариациями (рис. 6).

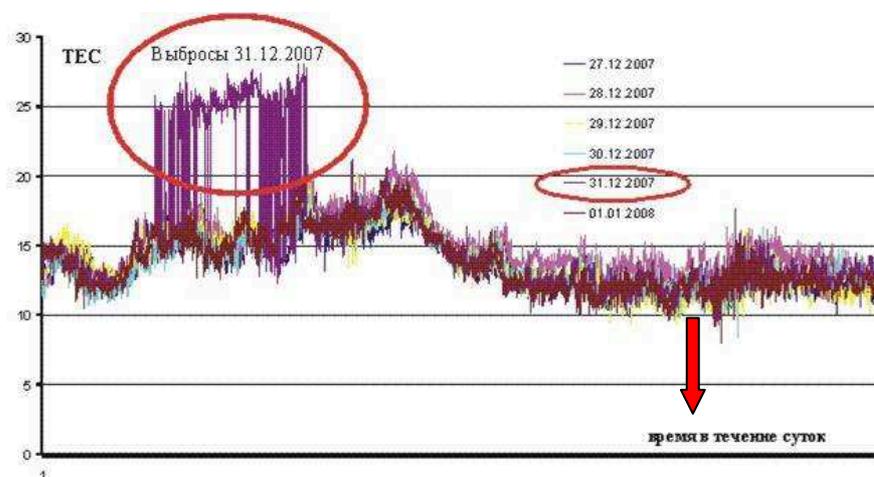


Рис. 6. Изменение оценок ПЭС без учета данных баллистики НКА в течение суток с 27.12.2007 г. по 1.01.2008 г.

Значительные выбросы оценок ПЭС 31.12.2007 г. могли быть обусловлены неисправностью аппаратуры, сбоями в передаче сигналов с НКА, образованием мощного спорадического Es-слоя, метеорным потоком, сейсмогенными движениями земной поверхности. Однако в данных ПЭС не было сообщений о сбоях в передаче сигналов с НКА.

Используя быстрые преобразования Фурье [12] для суточного объема данных ПЭС за 24, 26, 28, 31 декабря 2007г. и 1.01.2008 г. с дискретностью 30 секунд были рассчитаны амплитудные спектры вариаций ПЭС. Накануне землетрясения 31.12.2007 г. амплитуда минутных и

полутораминутных вариаций в данных ПЭС больше, чем в другие дни, в несколько раз. Для периодов более часа амплитуда вариаций ПЭС накануне землетрясения 31.12.2007 г. также повышена как и четвертьсуточных вариаций.

Таким образом, по данным сигналов НКА над республикой Кыргызстан перед сильным землетрясением выявлена аномалия ПЭС, которую нельзя объяснить солнечными или геомагнитными факторами. Отмечено, что амплитуда малых периодов возрастает перед землетрясением. Для диагностики морфологии возмущений ионосферы необходима большая дискретность анализируемых данных.

В работе установлено удовлетворительное соответствие выявленных возмущений ПЭС перед сильным землетрясением 31.12.2007 г. над республикой Кыргызстан с результатами, полученными другими авторами для сильных землетрясений разных регионов. Продемонстрирована возможность использования технологии локации возмущений ионосферы сигналами с НКА при диагностике предвестников сильного землетрясения над республикой Кыргызстан.

Диагностика возмущений ПЭС по данным сигналов НКА представляет особый интерес для совершенствования региональных систем сейсмического мониторинга.

Литература

1. *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли.– Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480с.
2. *Захаренкова И.Е., Шагимуратов И.И., Кранковски А., Лаговский А.Ф.* Ионосферные аномалии, наблюдаемые в GPS TEC измерениях перед землетрясением в Греции 8 января 2006г. (M=6.8) // Исследовано в России <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/110.pdf>
3. *Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J. et al.* A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N 8. P. 565-582.
4. *Яценков В.С.* Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. 272 с.
5. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* Global Positioning System: Theory and Practice. Springer-Verlag Wien. New York. 1992. P. 327.
6. *Бондур В.Н., Смирнов В.М.* Мониторинг вариаций ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясений по данным спутниковых навигационных систем / 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20-24, 2005, Saint Petersburg, Russian Federation.
7. *Сергеенко Н.П., Захаренкова И.Е.* и др. Планетарные движения макромасштабных неоднородностей, возникающих в слое F2 ионосферы над эпицентрами сильных землетрясений по данным GPS // *Исследование Земли из космоса*, 2006, № 5. С. 3-11.
8. *Смирнов В.М.* Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Исследовано в России <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf>.
9. *Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А.* Ионосферные предвестники землетрясений. - М.: Наука, 1992. 304 с.
10. *Pulinets S.A. and Boyarchuk K.* Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, Berlin, Germany, 2004. 315 p.
11. *Заболотная Н.А.* Индексы геомагнитной активности: Справочное пособие. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. 88 с.
12. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. 814 с.

Disturbance of total electron content of ionosphere in Kyrgyzstan region before strong earthquake 31.12.2007.

A.V. Tertyshnikov¹, I.E. Zakharenkova², V.O. Skripachev¹,
I.V. Surovtseva¹, A.M. Padohin³

¹*FSUE «RISDE»*

²*West Department of IZMIRAN*

³*Moscow State University*

For research ionosphere disturbances before strong earthquakes uses signals of navigational satellites. Investigated ionosphere conditions along signals way distribution and total electron content of ionosphere. Disturbances of TEC over Kyrgyzstan region in 27.12.07-01.01.08 are given. For TEC calculations were data ground GPS stations used: Bishkek and Talas. Shown ability applying technology of location ionosphere disturbances by signals of navigation satellites for monitoring precursors before strong earthquake over Kyrgyzstan region.

Keywords: Disturbances of ionosphere, signals of navigational satellites, total electron content, ground stations of ionosphere sounding, seismic monitoring, earthquakes.