

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

Тертышников А.В., Захаренкова И.Е.

По данным о характеристиках сигналов навигационных космических аппаратов GPS выявлены возмущения полного электронного содержания (ПЭС) атмосферы над республикой Кыргызстан перед сильным землетрясением региона. Морфология возмущений ПЭС согласуется с результатами исследований возмущений ионосферы над другими сейсмоактивными регионами Земли.

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») [1]. По характеристикам принятых сигналов НКА диагностируется состояние ионосферы и тропосферы вдоль трассы распространения сигнала, исследовать морфологию возмущений полного электронного содержания (ПЭС) атмосферы. ПЭС является основной характеристикой ионосферы, определяющей изменение параметров проходящей радиоволны.

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 2006 г. (магнитуда $M=6.8$), выявлено значительное изменение ПЭС за сутки до землетрясения – рис. 1.

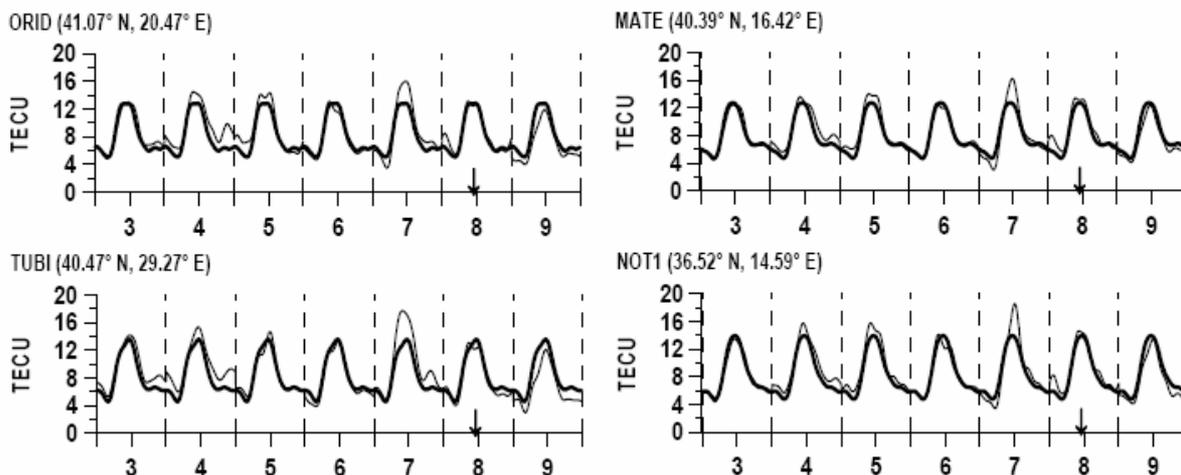


Рис. 1 – Вариации ПЭС для европейских станций ORID, TUBI, MATE и NOT1 за период 3-9 января 2006 г. Тонкая линия – текущая вариация ПЭС, толстая линия – среднее значение. Стрелкой отмечен момент землетрясения [2].

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 ПЭС за текущий день сравнивались с фоновыми ПЭС картами. В качестве фоновых использовались осредненные за рассматриваемый период значения TEC.

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.

На рис. 2 представлены рассчитанные карты тенденций ПЭС за 7.01.2006 г. из [2].

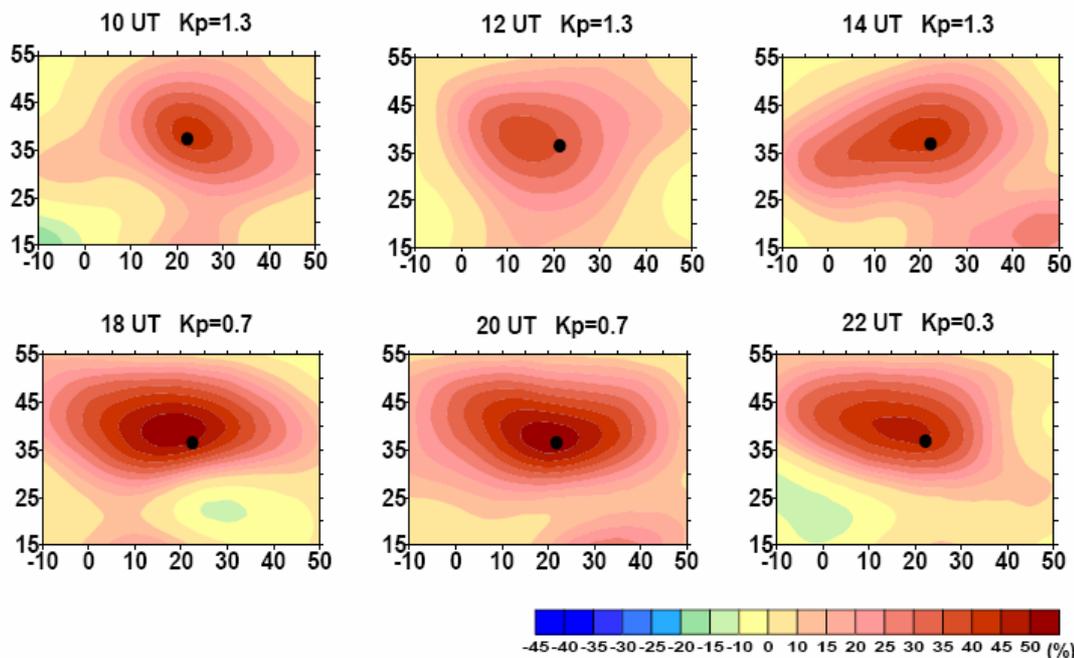


Рис. 2 – Карты тенденций ПЭС по широте и долготе для Европейского региона 7.01.2006 г. Точка – эпицентр землетрясения.

На фрагментах проявляется малоподвижная область повышенных значений ПЭС. Максимум области располагается в непосредственной близости от эпицентра землетрясения. Амплитуда возмущения в эти часы достигает ~40 % от фоновых значений, а в дальнейшем до 55 % в 18-20 UT. 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. 3 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 эпицентральною зону землетрясений.

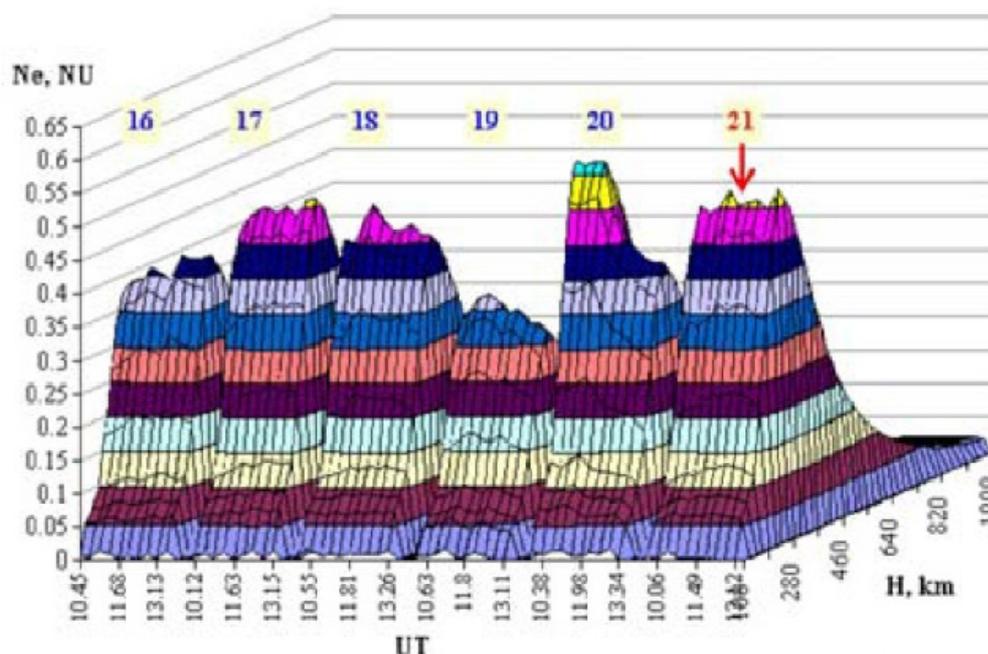


Рис. 3 – Профили электронной концентрации 16-21 сентября 2004 года на станции RIGA, спутник № 26 [6]

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. По наземным данным зондирования ионосферы размер 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 сейсмотектонической 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.

Для диагностики предвестниковых сейсмогенных возмущений ПЭС над республикой Кыргызстан было использовано сильное коровое землетрясение региона 31.12.2007 г. (~23 ч 10-21 мин. по местному времени, широта эпицентра 40,29° с.ш., долгота 72,99° в.д., глубина гипоцентра $z=6$ км, $M=5,8$). Положение станций приема сигналов НКА GPS и эпицентральной зоны землетрясения представлено на рис. 4.

Следует отметить, что 26.12.2007 г. произошло еще одно землетрясение, вызвавшее значительные разрушения. Эта 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.

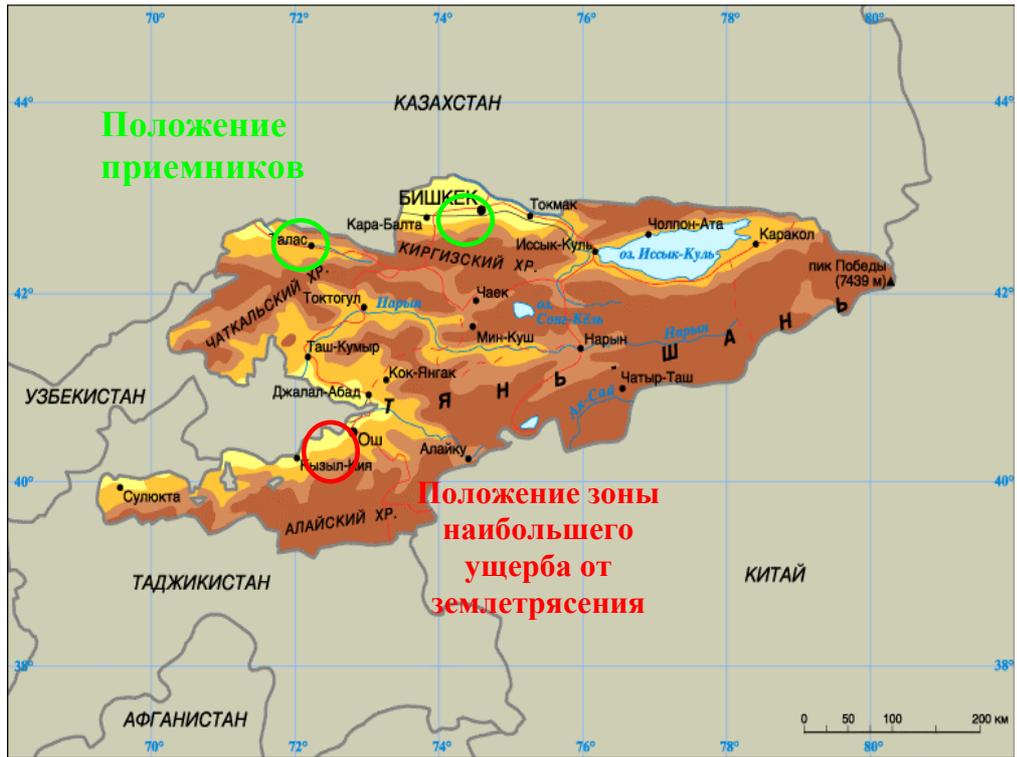


Рис. 3 – Положение приемников и эпицентральной зоны землетрясения

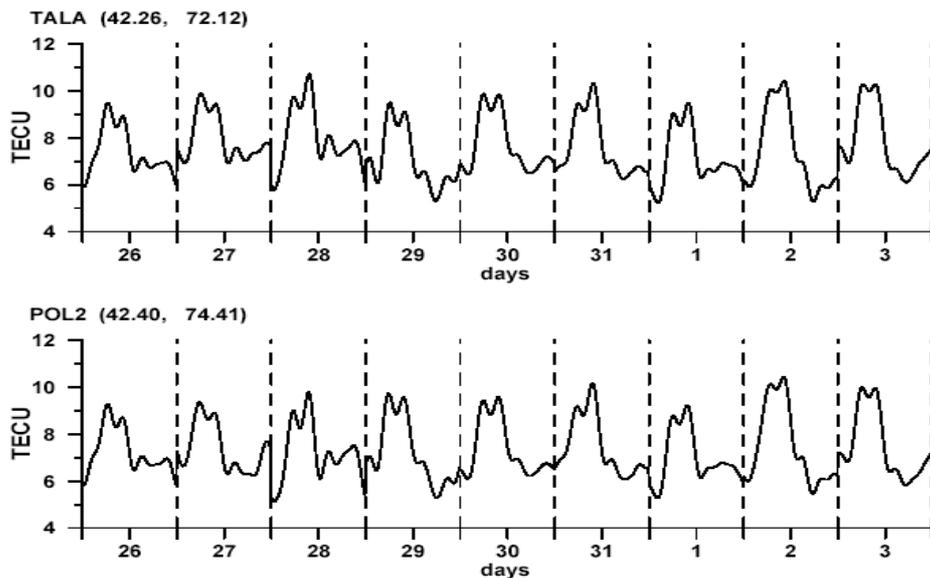


Рис. 4 – Изменение оценок ПЭС по станции Талас и Бишкек

За сутки-трое до землетрясения на 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 трехчасовыми индексами магнитной активности K_p [11] с 27.12.2007 г. по 3.01.2008 г. представлены на рис. 5.

Увеличение значений индекса K_p могло вызвать возмущение ионосферы 28.12.2007 г. и в меньшей степени 30.12.2007 г. Однако последнего не произошло. До 27.12.2007 геомагнитная обстановка была еще более спокойной.

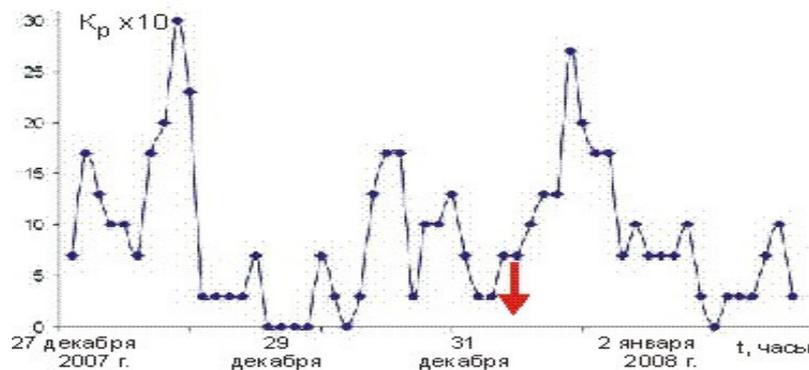


Рис. 5 – Изменение трехчасовых индексов магнитной активности ($10 \times K_p$)

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).

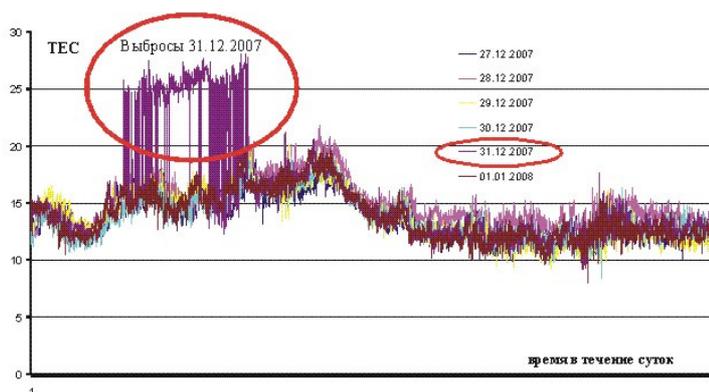


Рис. 6 – Изменение оценок ПЭС без учета данных баллистики НКА в течение суток с 27.12.2007 г. по 1.01.2008 г.

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

С использованием быстрого преобразования Фурье [12] для суточного объема данных ПЭС за 24, 26, 28, 31 декабря 2007 г. и 1.01.2008 г. с дискретностью 30 секунд были рассчитаны амплитудные спектры вариаций ПЭС. На рис. 7 приведен фрагмент амплитудного спектра вариаций ПЭС для периодов более 1 минуты.

Накануне землетрясения 31.12.2007 г. (кривая 4) амплитуда минутных и полутораминутных вариаций в данных ПЭС больше, чем в другие дни, в несколько раз. Значения амплитуд для минутного и полутораминутного периода вариаций ПЭС 25.12.200 г. составляют 859 и 569 отн. единиц, что соответствует фоновым вариациям. Для периодов более часа амплитуда вариаций ПЭС накануне землетрясения 31.12.2007 г. (кривая 4) также повышена – рис. 8, как и четвертьсуточных вариаций.

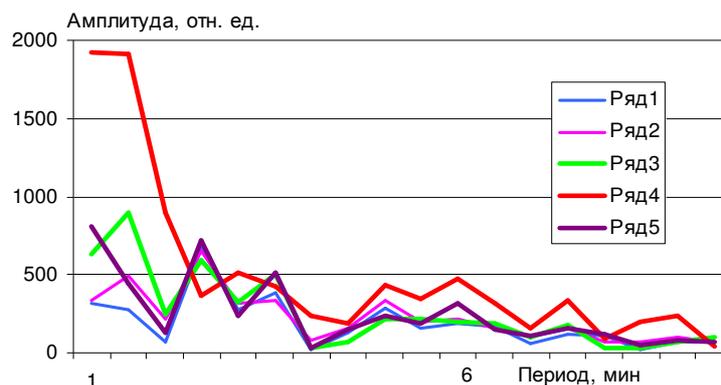


Рис. 7 – Фрагмент амплитудного спектра вариаций ПЭС для периодов более 1 минуты. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют 24, 26, 28, 31 декабря 2007 г. и 1.01.2008 г.

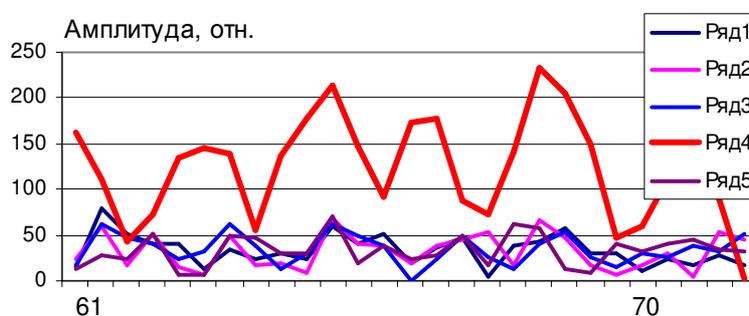


Рис. 8 – Фрагмент амплитудного спектра вариаций ПЭС для периодов более 60 минут. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют датам 24, 26, 28, 31 декабря 2007 г. и 1.01.2008 г.

Таким образом, по данным сигналов НКА над республикой Кыргызстан перед сильным землетрясением выявлена аномалия ПЭС, которую нельзя объяснить солнечными или геомагнитными факторами. Наземная станция ионосферного зондирования в Кыргызстане давно не функционирует.

Оценки ПЭС над республикой Кыргызстан рассчитывались также с учетом положения НКА. При этом, восточнее станции Бишкек оценки ПЭС 31.12.2007 г. оказались больше значений в выбранные для сравнения сутки (рис. 9).

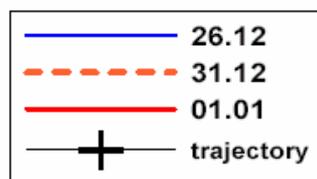
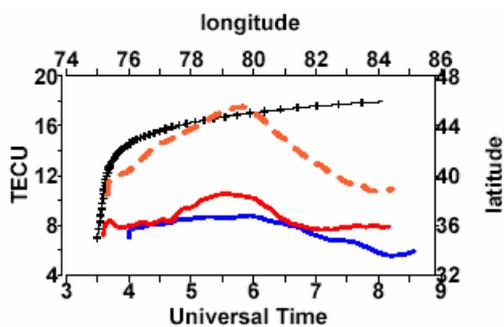
В данных НКА № 4 и 8 выделяется сложная морфология возмущений ионосферы – достаточно резкая граница ионосферного возмущения по широте. Расчеты характеристик сигналов НКА на станции Бишкек с западного сектора указывают на пониженное ПЭС 31.12.2007 г.

Аномальное возмущение ПЭС соответствует долготе эпицентра землетрясения. Его движение (данные с НКА № 8, 17, 4) ориентировано на восток с примерной скоростью 350-450 км/ч. Крутые границы возмущения ПЭС не обусловлены срывами приема сигналов, а отражают быстрое уменьшение оценок ПЭС.

Для станции ТАЛАС изменение ПЭС неоднозначно, хотя с западного сектора значения ПЭС больше (рис. 9 (б)). В данных НКА № 4 и 8 выделяется сложная морфология возмущений ионосферы – достаточно резкая граница ионосферного возмущения по широте.

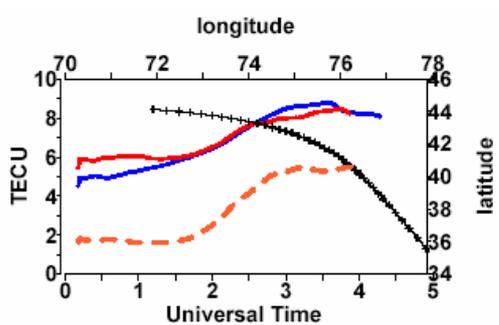
Таким образом, над республикой Кыргызстан впервые выявлены возмущения ПЭС перед сильным землетрясением региона.

Установлено удовлетворительное соответствие выявленных возмущений ПЭС с результатами исследований других авторов.

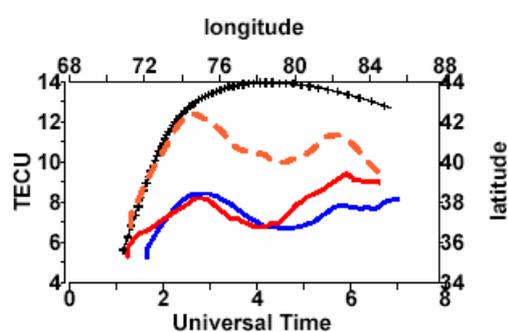


Обозначения кривых

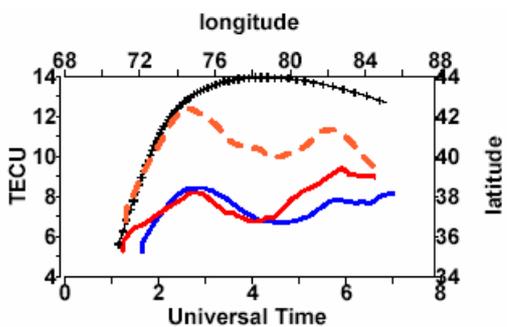
НКА № 4



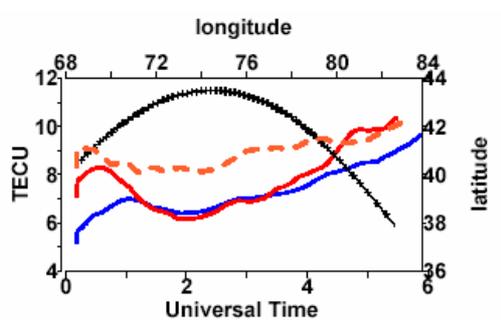
НКА № 8



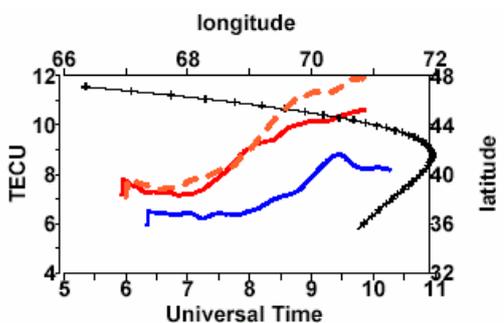
НКА № 17



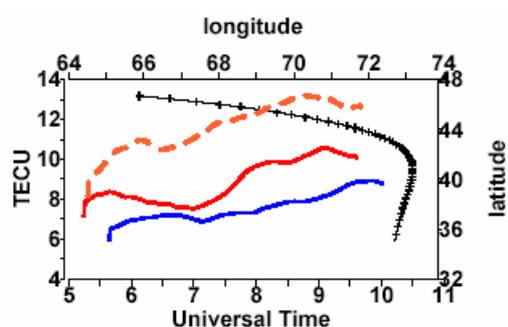
НКА № 26



НКА № 28

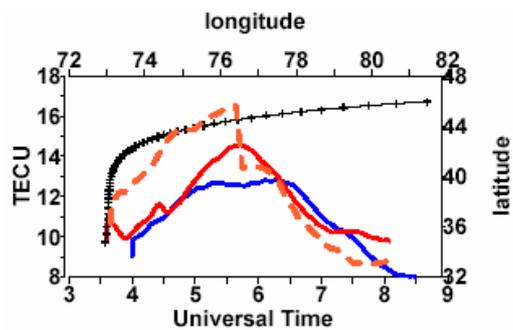


НКА № 5

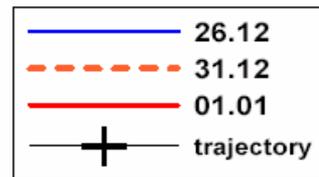


НКА № 12

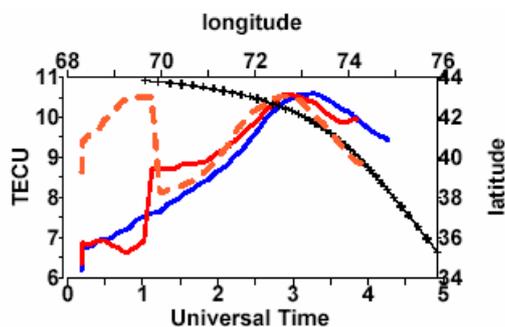
Рис. 9 (а) – Результаты расчета ПЭС на станции Бишкек по данным сигналов НКА.



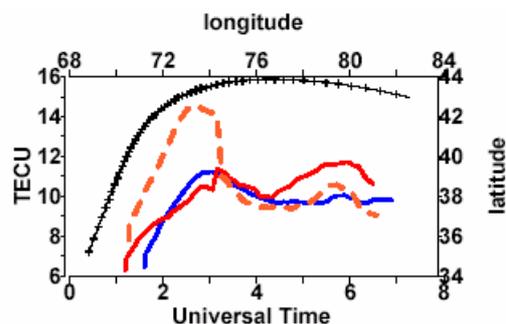
НКА № 4



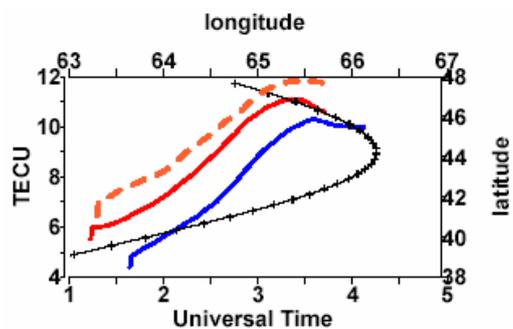
Обозначения кривых



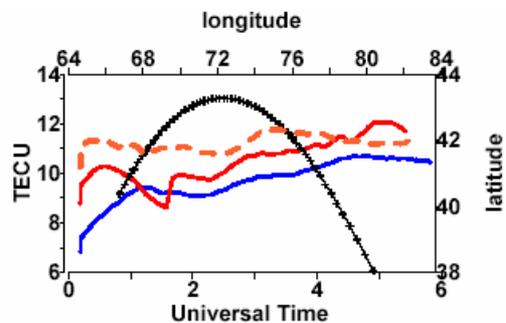
НКА № 8



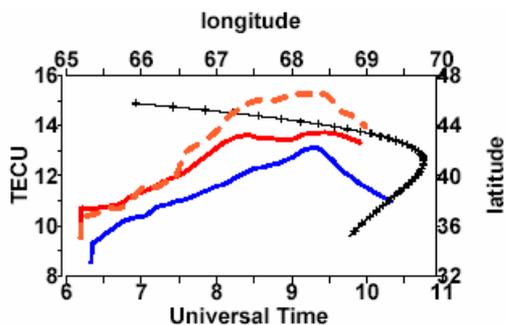
НКА № 17



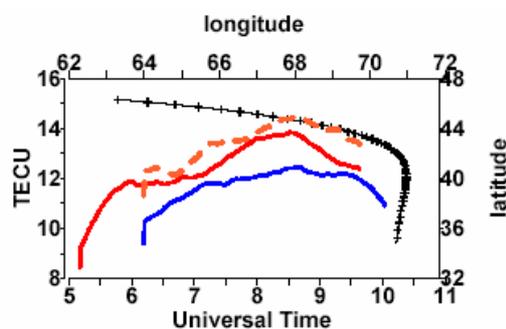
НКА № 26



НКА № 28



НКА № 5



НКА № 17

Рис. 9 (б) – Результаты расчета ПЭС на станции ТАЛАС по данным сигналов НКА.

Литература

1. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск:ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
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 2006 г. ($M=6.8$)//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. – Wien, New York: Springer-Verlag, 1992. P. 327.
6. Бондур В., Смирнов В. 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., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. – Berlin: Springer-Verlag, 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.