

Вариации полного электронного содержания ионосферы во время Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г.

И.Е. Захаренкова¹, И.И. Шагимурагов², А.Ф. Лаговский¹,
А. Кранковский³

¹ *Российский Государственный Университет им. И.Канта, Калининград*

² *Западное Отделение ИЗМИРАН, Калининград*

³ *Institute of Geodesy, Warmia and Mazury University in Olsztyn*

Аннотация. GPS наблюдения Европейской сети станций были использованы для выявления ионосферных предвестников уникального для Калининградского региона события – землетрясения 21 сентября 2004 г. с магнитудой $M \sim 4.9$. В вариациях полного электронного содержания ионосферы (TEC) была обнаружена специфическая аномалия, которая наблюдалась за сутки до землетрясения. Аномалия проявилась в повышении уровня TEC в дневные часы длительностью 4-5 часов и имела пространственные размеры ~ 1000 км.

Abstract. The GPS-derived total electron content (TEC) measurements have been used to detect ionospheric precursors for the unique Baltic Sea (near Kaliningrad, Russia) 21 September 2004 earthquake ($M = 4.9$). The GPS measurements of more than 100 stations of the EUREF network the TEC maps over Europe have been produced with the 15-minute interval. The specific ionospheric anomaly has been found on the base of the maps near the epicenter a day before the earthquake. The anomaly has been observed as a patch of the increase ionization about 4-5 hours in day time and has spatial size equal to ~ 1000 km. Taking into account the quiet geomagnetic conditions and characteristic parameters of the anomaly it has been associated with ionospheric precursors of the earthquake.

1. Введение

Ионосферные явления, связанные с сейсмической активностью, активно обсуждаются уже более 20 лет. Наиболее ранними работами явились исследования электромагнитных явлений, которые наблюдались до и после мощных землетрясений (*Гайворонская, Зеленова, 1989*). Наряду с ними проводились исследования по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений (*Липеровский и др., 1992*). Достаточно убедительные свидетельства ионосферных вариаций, ассоциированных с землетрясениями, представлены в работах (*Пулинец и др., 1998; Pulinets et al., 2003*). Согласно этим исследованиям, сейсмо-ионосферные аномалии обычно появляются за несколько дней или часов до землетрясения.

Для исследования ионосферных явлений сейсмогенной природы применяются различные методы. Чаще всего проводится анализ данных от отдельных станций вертикального зондирования ионосферы, а также данные пролетов ИСЗ (Алуэрт-1, Интеркосмос-19, Мир и др.). В отдельных случаях совместное использование этих данных позволяло получить некоторые пространственные характеристики сейсмогенного возмущения в ионосфере (*Краткосрочный..., 1999; Калинин и др., 2004; Пулинец, Легенька, 2003*). Однако эти методы имеют свои недостатки, главными из которых являются невозможность непрерывности и глобальности исследований, и, как следствие, отсутствие статистически значимых наборов экспериментальных данных, которые позволили бы проследить не только морфологические, но и динамические характеристики возбуждаемых ионосферных возмущений: направление перемещения, скорость распространения, положение возможного источника возмущения.

Новые возможности в изучении пространственно-временных характеристик модификации ионосферы перед землетрясениями предоставляет использование глобальной навигационной системы GPS (Global Positioning System). Плотная сеть наземных станций, одновременное глобальное покрытие, высокое временное разрешение и непрерывность во времени – те преимущества, которые позволяют получать оценку реальных пространственных масштабов и временной динамики сейсмо-ионосферных предвестников.

В настоящее время в Европейском регионе насчитывается более 100 станций, которые проводят непрерывное наблюдение на регулярной основе. Необходимо отметить, что каждая отдельная станция обеспечивает мониторинг ионосферы в радиусе более чем 1000 км, в том числе в труднодоступных местах.

Анализ GPS наблюдений показал, что вариации полного электронного содержания ионосферы (total electron content – TEC) очень чувствительны к изменению электронной концентрации области F_2 и могут эффективно использоваться для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений (*Fitzgerald, 1997; Oraevsky et al., 2000; Ruzhin et al., 2002; Liu et al., 2004*).

В работе представлены результаты анализа вариаций ТЕС с целью поиска ионосферных предвестников редчайшего для Калининградского региона явления – землетрясения 21 сентября 2004 г. Сила землетрясения по шкале Рихтера составила $M \sim 4.9$, данная магнитуда находится на пороге обнаружения ионосферных предвестников землетрясения (Pulinets et al., 2000). Благоприятными обстоятельствами для выявления ионосферных аномалий, связанных с сейсмической активностью, явились обособленность события и слабая изменчивость геомагнитной обстановки в 5 предшествующих дней.

2. Описание землетрясения

Землетрясение произошло 21 сентября 2004 г. в Калининградском регионе в районе Балтийского моря. Данный район не является сейсмоактивным, потому это явление стало уникальным событием. Землетрясение вызвало многочисленные нарушения в конструкциях и сооружениях и повлекло разрушение значительной части береговой линии Балтийского моря. По оценке Национального Центра Геологического обзора информации о землетрясениях (USGS National Earthquake Information Center) магнитуда землетрясения составила 4.8-4.9, географические координаты эпицентра ($54.86^\circ N, 19.98^\circ E$). Первый удар ($M \sim 4.8$) имел место в 11.05 UT, повторный толчок ($M \sim 4.9$) был зафиксирован в 13.32 UT.

3. Условия наблюдения

Обнаружение ионосферных эффектов землетрясений усложняется в периоды геомагнитных возмущений, когда значительно более сильные вариации параметров ионосферы "маскируют" более слабые сейсмо-ионосферные эффекты. Геомагнитная активность обусловлена солнечной активностью и состоянием межпланетной среды. На рис. 1 представлены вариации $\sum Kp$, Ap и Dst – индексов за период с 10 по 25 сентября 2004 г.

Характеризуя геомагнитную обстановку, можно сказать, что за рассматриваемый период геомагнитная обстановка менялась от слабо возмущенной до умеренно возмущенной. Максимальная возмущенность имела место 14 сентября ($\sum Kp = 34$). В дни, непосредственно предшествующие землетрясению, сумма Kp менялась в пределах 28-8.

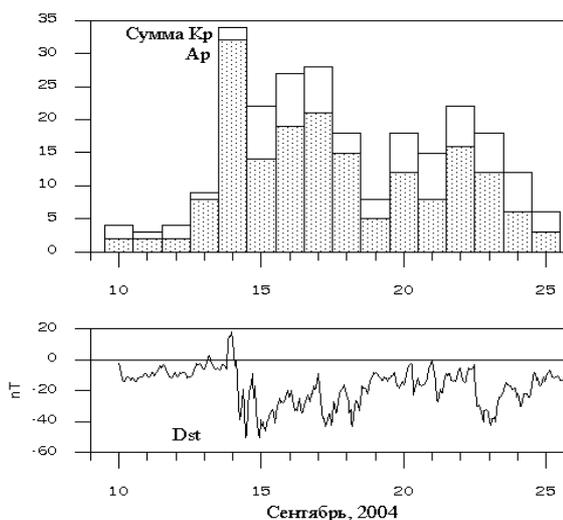


Рис. 1. Геомагнитные условия 10-25 сентября 2004 г.

4. Данные наблюдений

В качестве исходного материала служили данные о ТЕС, полученные по регулярным GPS наблюдениям Европейской сети станций.

Для получения абсолютной величины задержек и восстановления суточной вариации ТЕС над станцией использовалась методика, представленная в работе (Baran et al., 1997). В соответствии с ней, инструментальная задержка и абсолютное значение ТЕС рассчитываются, используя измерения всех пролетов спутников над станцией на 24-часовом интервале. В расчетах ионосфера аппроксимируется в виде тонкого слоя, расположенного на фиксированной высоте ($h = 400$ км). Для пересчета наклонного (вдоль луча) ТЕС в вертикальный используется геометрический фактор. В результате применения этой процедуры мы получаем как суточную вариацию ТЕС над станцией наблюдения, так и возможность анализа вариации абсолютной величины ТЕС вдоль траектории пролета для всех 24 спутников системы GPS.

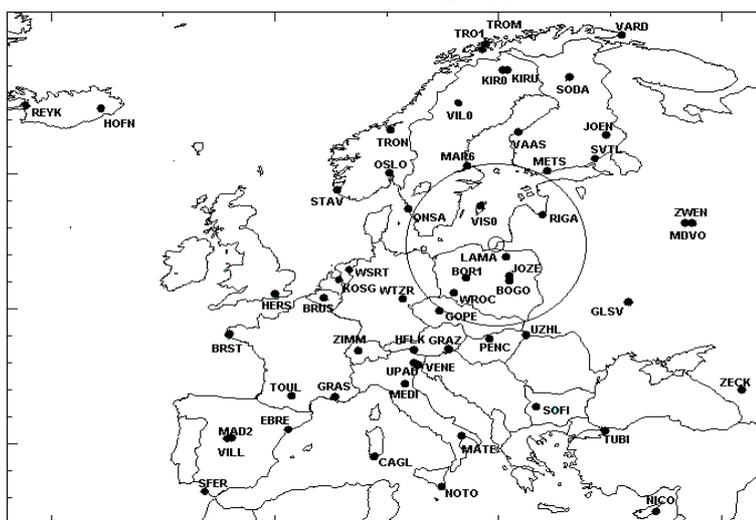


Рис. 2. Карта Европейских GPS станций. Кругом обозначена область ионосферы, которая диагностируется отдельной станцией

Параметр TEC достаточно точно следит за состоянием ионосферного слоя F2 и его пространственно-временными изменениями. Накопленный однородный материал позволяет проводить детальное исследование поведения параметра TEC для конкретной местности, а также дополнить алгоритмы анализа обнаружения сейсмоаномалий в ионосферной плазме или предвестников сейсмической активности в природе (Ruzhin et al., 2002).

На рис. 2 представлена карта GPS станций для Европейского сектора. Эпицентр землетрясения отмечен светлым кружком. Кругом обозначена область ионосферы, которая может диагностироваться GPS спутниками под углами более 25°. Район землетрясения может наблюдаться одновременно несколькими станциями. Ближайшая к эпицентру станция – LAMA (53.53° N, 20.40° E) – расположена всего в 150 км от места землетрясения.

5. Анализ экспериментальных данных

5.1. Суточные вариации TEC для станций

На рис. 3 представлены суточные вариации TEC в единицах измерения TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$) для 4 предшествующих дней и 1 дня после землетрясения над отдельными GPS станциями. Здесь же ниже графиков приведены вариации суммарной суточной геомагнитной активности (ΣKp). Визуальный просмотр суточных вариаций показывает, что за день до главного события (20 сентября) наблюдается anomальное поведение суточной вариации на всех трех станциях. Аномалия проявляется в виде специфического горба в суточном ходе около 11 UT. Такое специфическое поведение не наблюдалось на двадцатидневном интервале, центрированном ко дню землетрясения. Даже для наиболее возмущенного дня из представленных (17 сентября) характер суточной вариации практически не модифицировался по сравнению со спокойными днями.

На рис. 4 представлены вариации ΔTEC ($\Delta \text{TEC} = \text{TEC}_k - \text{TEC}_{\text{cp}}$) между значениями TEC для конкретного дня и средним значением TEC_{cp} , который был получен осреднением за десятидневный интервал.

Все три станции демонстрируют весьма схожую картину поведения дифференциального TEC. Явно выделяется специфическое, anomальное поведение TEC в районе полудня. Характерно, что сначала (до 06 UT) уровень TEC снижался от нулевого до отрицательного значения ($\sim -3 \text{ TECU}$), затем достаточно быстро возрос до положительного уровня ($\sim 4 \text{ TECU}$), таким образом, амплитуда положительного всплеска достигла величины около 4-5 TECU, что составило около 25-30 % относительно спокойного уровня. Необходимо отметить, что скорость увеличения и понижения TEC одна и та же, а восстановление TEC после 14 UT происходило симметричным образом.

5.2. Анализ пространственно-временной вариации TEC

При формировании суточной вариации TEC по отдельным пролетам над станцией наблюдения участвуют измерения с достаточно большой пространственной области ионосферы с различных азимутов. Таким образом, суточная вариация получается посредством осреднения TEC по пространственной области.

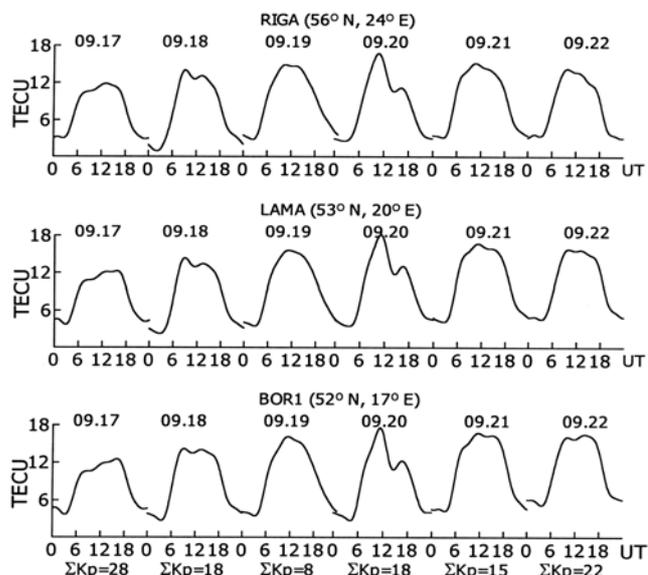


Рис. 3. Суточные TEC вариации для станций Рига, Ламковка, Боровец за 4 дня до и 1 день после землетрясения ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$)

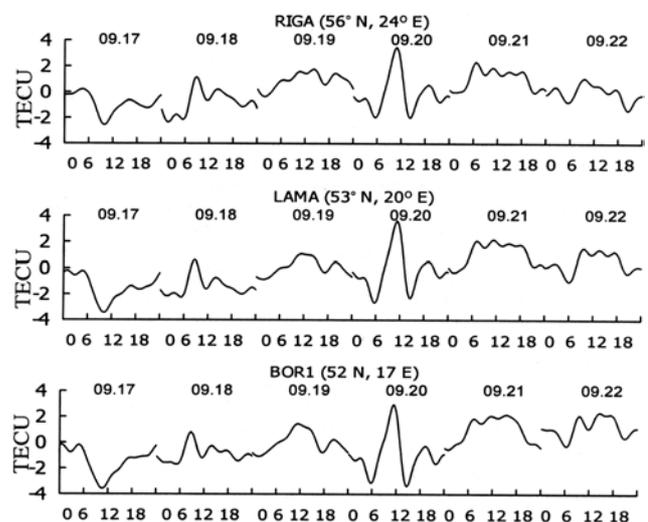


Рис. 4. Относительные вариации TEC (разность между текущим и средним значением) за 17-22 сентября 2004 г. для станций Рига, Ламковка, Боровец

Более детальную картину изменения ТЕС можно проследить в вариациях ТЕС вдоль пролетов отдельных спутников. На рис. 5 представлены траектории (подионосферные точки) пролетов спутников, которые наблюдались над станцией LAMA около 10-11 часов UT.

На рис. 6 представлены вариации ТЕС вдоль пролетов для спутников № 26 и № 29 для дня, в котором проявилась сейсмо-ионосферная аномалия, и предшествующие сутки (19 сентября). Также на рисунке показаны в географических координатах траектории пролетов спутников. Для GPS спутников период обращения составляет 12 звездных часов, таким образом, каждый спутник появляется через сутки над одной и той же областью с временным сдвигом около 4 минут.

Аномальное повышение ТЕС наблюдалось на временном интервале 9-12 часов, в долготном диапазоне 6-10° E. Максимальное повышение ТЕС относительно предшествующего дня составило 5-6 TECU.

6. Обсуждение результатов

Специфическое поведение ТЕС 20 сентября 2004 г. за сутки до главного события можно рассматривать как ионосферный предвестник землетрясения по нескольким признакам.

Предвестники землетрясения, проявляющиеся в ионосфере, регистрируются несколько дней, часов над областью подготовки землетрясения (Pulinets, 1998; Liu et al., 2000; Калинин и др., 2004). Ионосферные аномалии могут быть вызваны электрическими полями, которые возникают над областью подготовки землетрясения, и, проникая на ионосферные высоты, вызывают изменения различных ионосферных параметров (Oraevsky et al., 1994; Oraevsky et al., 2000; Pulinets et al., 2003).

Величина зоны действия деформационных процессов в период подготовки землетрясения напрямую зависит от его силы. Согласно работе (Dobrovolsky et al., 1979), радиус этой зоны может быть оценен как

$$\rho = 10^{0,43M}.$$

Для регистрируемого землетрясения (M ~ 4.9) радиус зоны подготовки составил $\rho = 130$ км.

В работе (Pulinets et al., 2000) порог по магнитуде оценивается величиной $M \sim 5.0$, таким образом, интенсивность сейсмо-ионосферной аномалии в нашем случае должна быть невысокой. По нашей оценке, отклонение ТЕС от среднего значения составило ~ 4-5 TECU. В работе (Liu et al., 2004) для Тайваньских землетрясений с $M > 6.0$ интенсивность ионосферных предвестников составляла 10 и более TECU, при этом чаще всего они детектировались в вечернее время (18-22 LT). Это объясняется тем, что эффективность проникновения аномального электрического поля на ионосферные высоты ночью выше, чем днем. Для

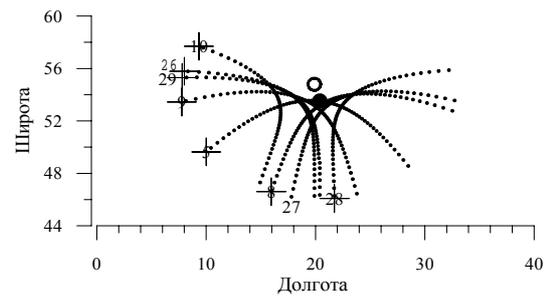


Рис. 5. Траектории пролетов GPS спутников над станцией LAMA на высоте 400 км

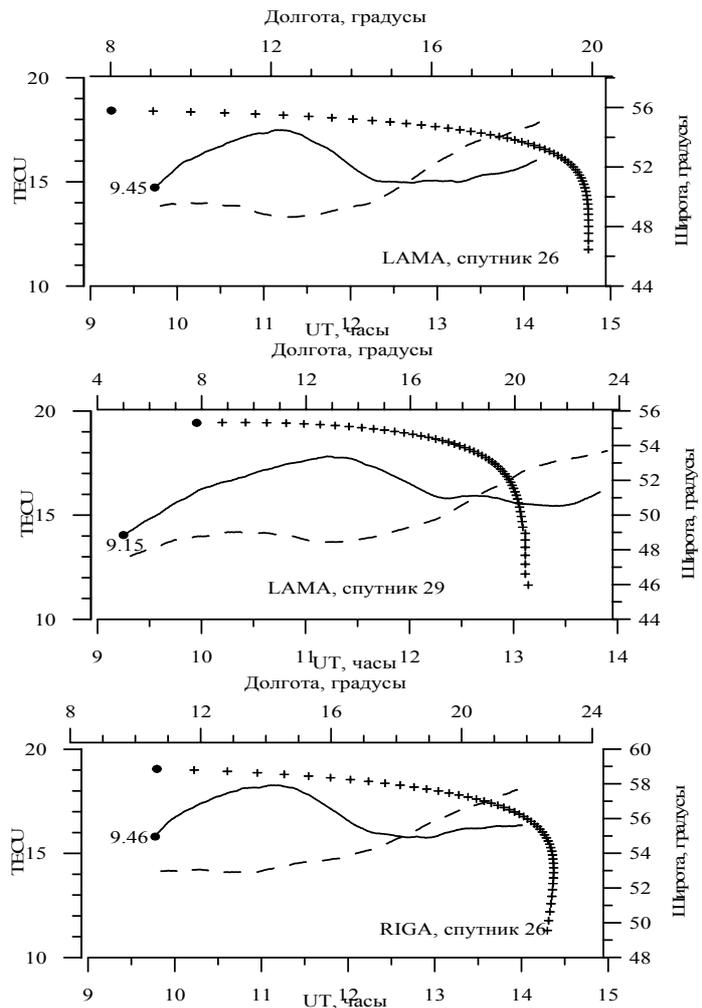


Рис. 6. Вариации ТЕС вдоль пролетов спутников для 19-20.09.2004 (19.09 – штриховая, 20.09 – сплошная линия).

Здесь же представлены координаты подионосферных точек вдоль пролетов спутников (+)

рассматриваемого землетрясения, несмотря на его относительно слабую величину, аномалия проявилась в дневное время. Дневная аномалия наблюдалась нами и для Турецкого землетрясения 12 ноября 1999 ($M \sim 7.5$). Для него предвестники наблюдались также за сутки до главного события в дневное время, при этом дневное увеличение TEC составило ~ 10 TECU (Oraevsky et al., 2000).

Одним из признаков сейсмо-ионосферной аномалии является ее временная продолжительность. Часто во время землетрясения или накануне наблюдаются магнитные бури, которые затрудняют обнаружение предвестников землетрясения. Аномальная модификация ионосферы во время бури может продолжаться десятки и более часов. Для рассматриваемого периода интенсивных магнитных бурь не наблюдалась. В целом геомагнитная обстановка была слабо возмущенной, что позволило довольно уверенно выявить аномалию в поведении TEC.

Размеры сейсмо-ионосферной аномалии, в зависимости от магнитуды землетрясения (для $M > 6.0$), оцениваются величиной в 1000 и более километров (Калинин и др., 2004). Для оценки размеров ионосферной аномалии в данных TEC нами строились карты для Европейского региона. Для этого использовались одновременные GPS наблюдения более чем с 50 станций. TEC карты строились с 15-минутным разрешением (Шагимуратов и др., 2002). Для выявления ионосферной аномалии использовались дифференциальные TEC карты. В нашем случае карты для 20 сентября – дня, в котором наблюдалось аномальное поведение TEC, – нормировались относительно предыдущего дня (19 сентября).

На рис. 7 представлены дифференциальные 15-минутные карты TEC над Европой в момент максимального проявления аномалии. Видно, что динамика развития аномалии достаточно велика. Размер зоны повышенного TEC составляет 1000-1500 км. Сейсмо-ионосферная аномалия не располагается непосредственно над эпицентром, а находится на юго-западе от него, впоследствии смещаясь на восток. Представленные результаты согласуются с ранее полученными данными о проявлении ионосферных эффектов сейсмогенной природы. На смещение сейсмо-ионосферной аномалии относительно вертикальной проекции эпицентра будущего землетрясения оказывает два фактора. Во-первых, электрическое поле передается в ионосферу вдоль силовых линий магнитного поля, поэтому в большинстве случаев область в ионосфере сдвинута к югу от проекции эпицентра в Северном полушарии, и к северу – в Южном. Во-вторых, конфигурация пространственного заряда электрического поля над поверхностью Земли в значительной степени зависит от турбулентных процессов в приземном слое, и при наличии ветра заряд может переноситься на значительные расстояния (Пулинец, Легенька, 2003).

Таким образом, по всем признакам обнаруженную аномалию в вариациях TEC за день до главного события можно ассоциировать с предвестником Калининградского землетрясения.

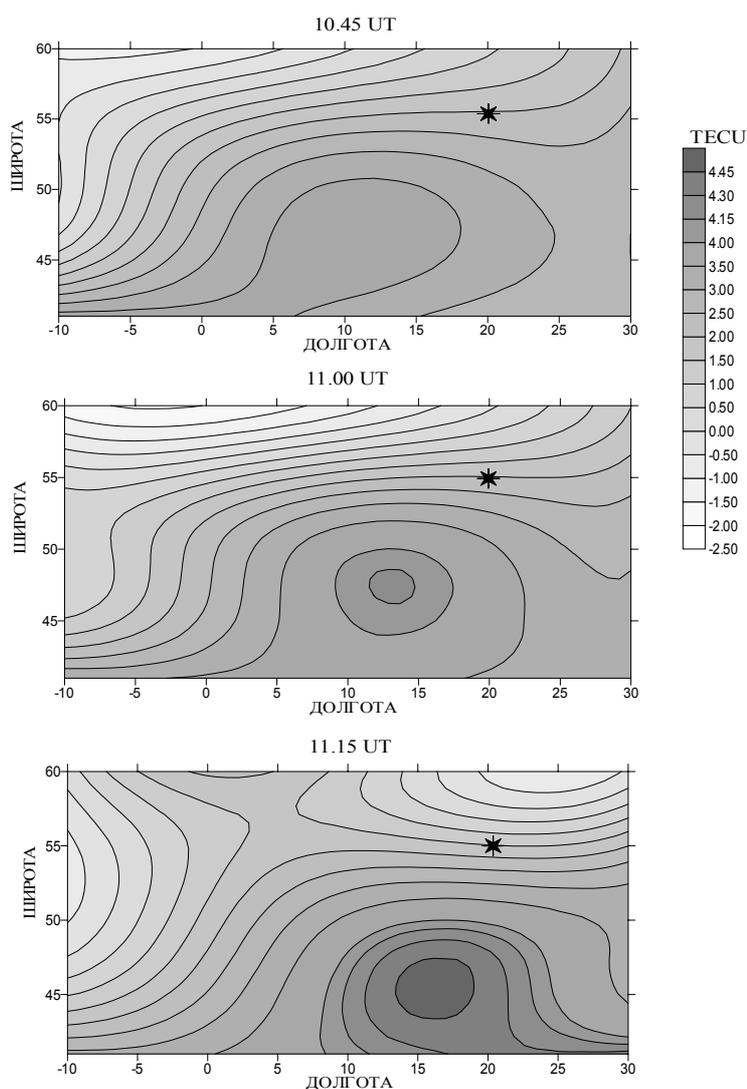


Рис. 7. Дифференциальные карты для 20 сентября 2004 в момент максимального проявления аномалии

7. Заключение

По данным GPS наблюдений проведен анализ вариаций TEC для уникального в рассматриваемом регионе Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. В вариациях TEC за сутки до главного толчка была обнаружена сейсмо-ионосферная аномалия в виде специфического повышения уровня TEC над местом действия будущего землетрясения. Анализ аномалии показал, что по ряду признаков – локальность аномалии, размеры зоны проявления, характерное время существования – ее можно ассоциировать с предвестниками сейсмической активности. Результаты исследования продемонстрировали, что при достаточно благоприятных геофизических условиях сейсмо-ионосферные предвестники могут быть выделены даже для несильного землетрясения.

Авторы выражают благодарность Якимовой Г.А., Тепенициной Н.Ю., Колтуненко Е.М. за помощь в обработке GPS наблюдений.

Литература

- Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitsina N.J.** The use of GPS for ionospheric studies. *Artificial Satellites*, v.32, N 1, p.49-60, 1997.
- Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I.** Estimation of the size of earthquake preparation zone. *Pageoph.*, v. 117, p.1025-1044, 1979.
- Fitzgerald T.J.** Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.59, N 7, p.829-834, 1997.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Pulinets S.A., Tsai Y.B., Chuo Y.J.** Seismo-ionospheric signatures to M > 6.0 Taiwan earthquakes. *Geophysical Research Letters*, v.27, N 19, p.3113-3116, 2000.
- Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulinets S.A., Yu S.B.** Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement. *Annales Geophysicae*, v.22, p.1585-1593, 2004.
- Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh.** Seismo-ionospheric precursors and atmospheric electricity. *Turk. J. of Physics*, v.18, N 11, p.1229-1234, 1994.
- Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Shagimuratov I.I.** Anomalies of ionospheric TEC above Turkey before two strong earthquakes at 1999. *Proceed. 15th Wroclaw EMC Symposium*, 2000.
- Pulinets S.A.** Seismic activity as a source of the ionospheric variability. *Adv. Space Res.*, v.22, N 6, p.903-906, 1998.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M.** Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling. *Adv. Space Res.*, v.26, N 8, p.1209-1218, 2000.
- Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh.** Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.65, p.1337-1347, 2003.
- Ruzhin Yu.Ya., Oraevsky V.N., Shagimuratov I.I., Sinelnikov V.M.** Ionospheric precursors of earthquakes revealed from GPS data and their connection with "sea-land" boundary. *Proceed. 16th Wroclaw EMC Symposium*, 2002.
- Гайворонская Т.В., Зеленова Т.И.** Анализ вариаций критических частот f_0F_2 во время землетрясений 1976 и 1984гг в Средней Азии. Препринт № 5 (831). М., ИЗМИРАН, 20 с., 1989.
- Калинин Ю.К., Сергеенко Н.П., Сазанов А.В.** Динамика макромасштабных ионосферных неоднородностей, возникающих в главном максимуме в окрестностях эпицентров сильных землетрясений. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.44, № 2, с.239, 2004.
- Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Под ред. В.Н. Страхова, В.А. Липеровского. М., ОИФЗ РАН, 176 с., 1999.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А.** Ионосферные предвестники землетрясений. М., Наука, 304 с., 1992.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д.** Пространственно-временные характеристики крупномасштабных возмущений электронной концентрации, наблюдаемых в области F ионосферы перед сильными землетрясениями. *Космические исследования*, т.41, № 3, с.240-249, 2003.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И.** Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя от местного времени. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.38, № 3, с.178, 1998.
- Шагимуратов И.И., Баран Л.В., Якимова Г.А., Колтуненко Л.М.** Восстановление пространственно-временного распределения ПЭС ионосферы по данным многостанционных GPS наблюдений. *Труды XX Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн", 2-4 июля 2002 г., Нижний Новгород*, с.125-126, 2002.