

УДК 550.510.535

ИОНОСФЕРНЫЙ ПРЕДВЕСТНИК РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ПРОИЗОШЕДШЕГО 6 АПРЕЛЯ 2009 г. В Л'АКВИЛЕ (ИТАЛИЯ)

© 2011 г. В. В. Хегай¹, А. Д. Легенька¹, В. П. Ким¹, К. Георгиева²

¹Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.)

²Центральная лаборатория солнечно-земных воздействий БАН, г. София, Болгария
e-mail: hegai@izmiran.rssi.ru

Поступила в редакцию 01.09.2009 г.

После переработки 03.06.2010 г.

На основе пятнадцатиминутных данных ряда станций наземного вертикального зондирования ионосферы проведено исследование вариаций критической частоты f_oF2 перед сильным землетрясением ($M = 6.3$), которое произошло 6 апреля 2009 г. в Италии в г. Л'Аквила. Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 85 км к северо-востоку от Рима. Примерно за 20 ч до землетрясения на ионосферной станции Рим в течение почти полутора часов наблюдался четко выраженный статистически значимый эффект увеличения f_oF2 относительно среднего фонового уровня для магнито-спокойных дней. При этом на удаленных от эпицентра землетрясения контрольных станциях за аналогичный период наблюдения статистически значимых отклонений f_oF2 от фоновых значений выявлено не было, что дает основание рассматривать наблюдавшийся на станции Рим эффект увеличения f_oF2 как возможный ионосферный предвестник случившегося землетрясения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Землетрясение, произошедшее в Л'Аквиле 6 апреля 2009 г. в 01:32:42.4 UT, стало одним из самых разрушительных на территории Италии за последние 30 лет. Магнитуда землетрясения составила $M = 6.3$, а его гипоцентр находился на глубине 8.8 км в пяти километрах (42.38°N ; 13.32°E) от центра г. Л'Аквила, расположенного на расстоянии 95 км северо-восточнее Рима. Представляет интерес исследовать поведение ионосферы над эпицентральной зоной данного землетрясения в процессе его подготовки на предмет выявления возможного ионосферного предвестника землетрясения. Проблеме существования ионосферных предвестников землетрясений посвящены многочисленные публикации (см., например, монографию [Pulinets and Boyarchuk, 2004] и ссылки в ней). Из недавних работ можно отметить [Zhao et al., 2008] и [Liu et al., 2009]). Ранее в работе [Легенька и др., 2007] было проведено исследование ионосферных возмущений, связанных с двумя сильными землетрясениями, произошедшими в итальянском регионе 7.01.1962 г. ($M = 6.0$) и 5.04.1998 г. ($M = 5.3$) на фоне низкой геомагнитной активности. Анализ поведения критических частот f_oF2 по часовым данным для расположенной наиболее близко к эпицентрам ст. Рим (эпицентральные расстояния $R = 412$ и $R = 170$ км соответственно) показал, что

для этих землетрясений за сутки и часы до сейсмического толчка на геомагнитно-спокойном фоне надежно выделяются отклонения от месячной медианы, более чем в полтора раза превышающие стандартное, которые, по-видимому, являлись ионосферными предвестниками землетрясений, так как возмущений значимой величины в те же моменты времени не наблюдалось на контрольных европейских станциях, находящихся на значительном удалении от эпицентра ($R \sim 1000$ км). Землетрясение в Л'Аквиле превзошло по своей силе оба упомянутых выше, а его эпицентр оказался существенно ближе к ст. Рим, причем геомагнитная обстановка в предшествующий ему девятидневный период и в сам день землетрясения была очень спокойной ($Kp \leq 2$). Кроме того, подходящий набор наземных станций вертикального зондирования ионосферы обеспечивал получение данных по критическим частотам f_oF2 с пятнадцатиминутным интервалом (в отличие от стандартного часового).

В настоящей работе на основе 15-минутных данных наземных ионосферных измерений проведено исследование вариаций критической частоты f_oF2 , наблюдавшихся вблизи эпицентра землетрясения на ст. Рим и на ионосферных станциях, расположенных вдали от эпицентра, с целью выявления ионосферного предвестника землетрясения в Л'Аквиле.

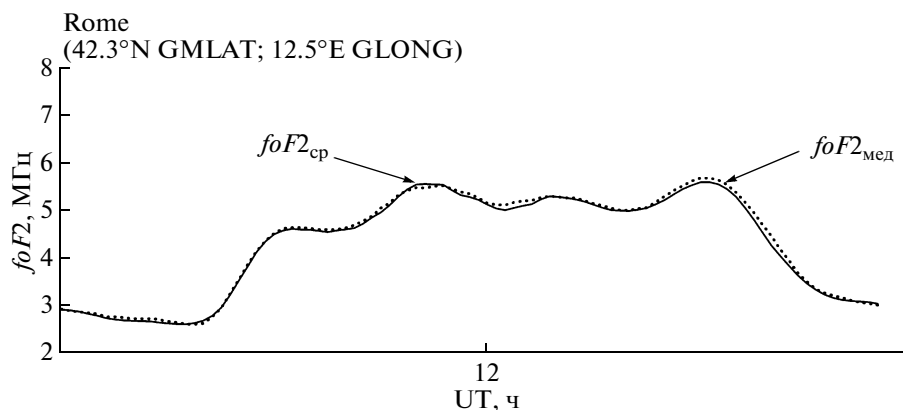


Рис. 1. Суточный ход скользящих средних значений $foF2_{cp}$ (сплошная кривая) и $foF2_{мед}$ (точки) для ст. Рим (Rome) с “окном” усреднения 5 точек. Интервал в исходных данных составляет 15 мин.

2. СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ДАННЫХ

В данной работе для количественной оценки возмущений $foF2$ используется способ выделения ионосферных возмущений, предложенный в работе [Хегай и др., 2009], при котором вводятся параметры отклонения $D1$ и $D2$, которые определяются следующими соотношениями:

$$D1 = foF2 - (foF2_{cp} - k\sigma), \quad (1)$$

$$D2 = (foF2_{cp} + k\sigma) - foF2, \quad (2)$$

где $foF2_{cp}$ – среднее значение $foF2$ по выбранному набору (геомагнитно-спокойных) дней, k – коэффициент, определяющий степень жесткости отсечки “шума” ($k \geq 1$), а σ – стандартное среднеквадратичное отклонение. Отрицательный знак значения параметра $D1$ соответствует уменьшению $foF2$ по сравнению с $foF2_{cp}$ на величину, превышающую стандартное отклонение более чем в k раз, а отрицательное значение параметра $D2$ означает, что критическая частота $foF2$ превышает $foF2_{cp}$ на величину большую, чем $k\sigma$. Таким образом, отрицательные значения $D1$ и $D2$ указывают на отрицательные и положительные возмущения $foF2$ соответственно. Для более наглядного представления данных далее мы будем использовать параметры $D1$ и $D2$, нормированные на величину $foF2_{cp}$ и обозначаемые как $R(D1)$ и $R(D2)$. Тогда, в процентном выражении, $R(D1,2) = [100(D1,2)/foF2_{cp}] \%$.

В настоящем исследовании мы задали максимально высокую степень доверительности выделения ионосферных возмущений, приняв $k = 4$, т.е. уровень отсечки “шума” соответствует четырем стандартным отклонениям. Это означает, что с вероятностью 99.99% все случайные отклонения (в предположении о нормальном распределении соответствующей случайной величины) должны укладываться в “шумовую дорожку” $\pm 4\sigma$ от своих средних значений. Таким образом, все отрица-

тельные значения во временном ходе $R(D1,2)$ должны рассматриваться как неслучайные.

В исследуемом нами интервале времени (с 28.03.2009 г. по 06.04.2009 г.) все дни оказались геомагнитно-спокойными, так как любое значение трехчасового Kp -индекса не превышало 2-х в течение всего указанного интервала, поэтому в качестве массива опорных дней был задан семидневный период с 28 марта по 3 апреля 2009 г. Выбранный массив данных был подвергнут тестированию на предмет нормальности распределений данных при помощи критерия Колмогорова–Смирнова, которое показало, что распределения в рассматриваемых выборках оказались близкими к нормальному. Кроме того, в пользу справедливости этого вывода свидетельствует и близость медианных и средних значений $foF2$. Для использованных выборок по совокупности контрольных дней, расхождение составляет единицы процентов, что иллюстрирует рис. 1, на котором показан суточный ход скользящих средних значений $foF2_{cp}$ и скользящей медианы $foF2_{мед}$ для ст. Рим (Rome).

3. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 приведены изменения основных параметров, характеризующих геофизическую ситуацию в изучаемый период. Видно, что в рассматриваемый период не наблюдалось не только магнитных бурь или суббурь, но сколько-либо значимых магнитных возмущений. Kp -индекс, как уже отмечалось выше, не превышал уровня $Kp = 2$, значения усредненного за час Dst -индекса лежат в интервале от -10 до 11 нТл, а средний за сутки поток солнечного излучения на волне 10.7 см (индекс $F10.7$) колеблется вблизи 70 единиц sfu ($1 sfu = 10^{-22}$ Вт/м²), что соответствует низкому уровню солнечной активности. Таким образом,

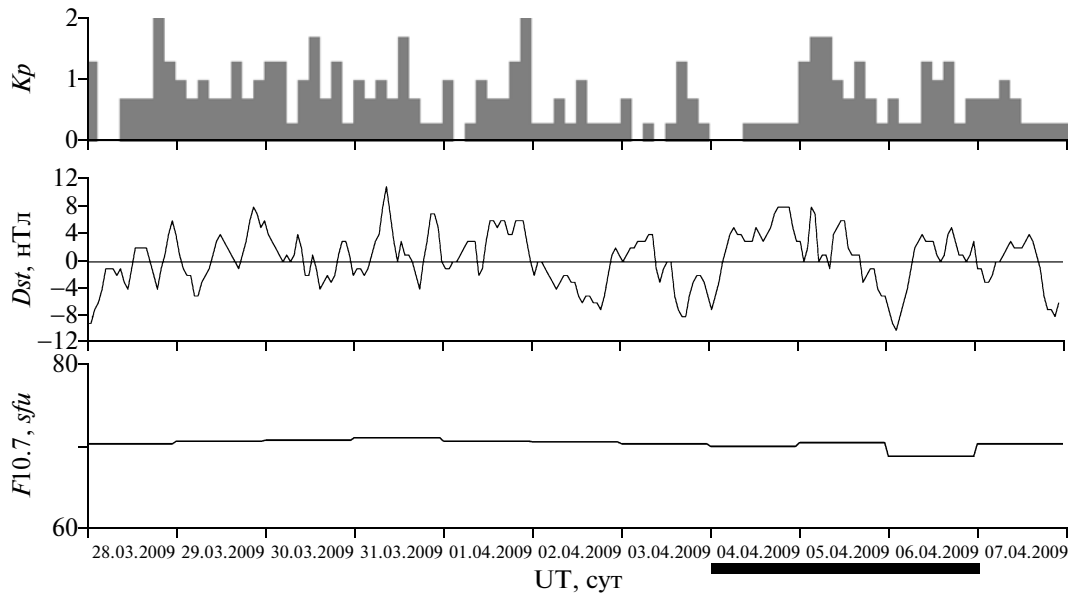


Рис. 2. Временные вариации параметров, характеризующих общую геофизическую ситуацию в период с 28.03.2009 г. по 07.04.2009 г.: K_p -индекс (верхняя панель), Dst -индекс (средняя панель), индекс $F10.7$ (нижняя панель). Черный прямоугольник отмечает дни, в которые поведение ионосферы по выбранному набору станций представлено детально ниже на рис. 3, 4.

можно ожидать отсутствия в данный период значимых ионосферных возмущений планетарного масштаба.

На рис. 3, для иллюстрации, представлен фрагмент географической карты Италии, на которой звездочкой показан эпицентр землетрясения 06.04.2009 г. в Л'Аквиле, видно также относительное расположение ст. вертикального зондирования ионосферы Рим (Rome).

В соответствии с оценкой радиуса зоны подготовки землетрясения в зависимости от величины его магнитуды по Добровольскому [Dobrovolsky et al., 1979]: $r_M = 10^{0.43M}$, где r_M – радиус зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли в км, а M – магнитуда, для $M = 6.3$ получаем $r_{6.3} \approx 512$ км, т.е. ст. Рим, удаленная от эпицентра на 85 км, находилась глубоко внутри зоны подготовки этого землетрясения. Расположенные в одном часовом поясе местного времени со ст. Рим (Rome) (42.3°N GMLAT ; 12.5°E GLONG) станции Pruhonice (49.7°N GMLAT ; 14.6°E GLONG) и Juliusruh (54.3°N GMLAT ; 13.4°E GLONG) находятся на эпицентральных расстояниях 860 и 1370 км соответственно к северу от ст. Рим и не входят в зону подготовки землетрясения, поэтому они могут служить в качестве контрольных станций. (В скобках после названий станций даны геомагнитная широта GMLAT и географическая долгота GLONG).

На рис. 4 представлены временные вариации скользящего среднего параметров $R(D1, D2)$ для трех перечисленных станций с 04.04.2009 г. по

06.04.2009 г., скользящее окно усреднения составило 5 точек, что означает усреднение на интервале в один час для каждой точки, взятой через 15 мин (значение в самой точке, две предыдущие и две последующие).

Видно, что примерно за 20 ч до момента землетрясения только на ст. Rome наблюдается превышение с амплитудой порядка 12% (отмечено зачерненным участком кривой $D2$, 5.04.2009 г. вблизи 04:00 UT) порогового уровня 4σ продолжительностью около полутора часов. Затененные прямоугольники под осью абсцисс на нижней панели отмечают интервалы местного времени от 18:00 до 06:00 LT. Таким образом, с определенной степенью вероятности можно предположить, что так проявляется в ионосфере на высотах области F процесс подготовки землетрясения, и отмеченное ионосферное возмущение является предвестником этого землетрясения.

На рис. 5 в тех же обозначениях показано временное поведение скользящего среднего параметров $R(D1, D2)$ для другого набора контрольных станций: Dourbes (51.7°N GMLAT ; 4.6°E GLONG), Point Arguello (42.3°N GMLAT ; $239.4^\circ\text{E GLONG}$), Grahamstown (33.9°S GMLAT ; 26.5°E GLONG).

Станция Dourbes расположена в Европе, местное время станции совпадает с мировым, ее эпицентрального расстояние по дуге большого круга составляет примерно 1100 км. Станция Point Arguello находится в Северной Америке и ее геомагнитная широта совпадает с геомагнитной широтой

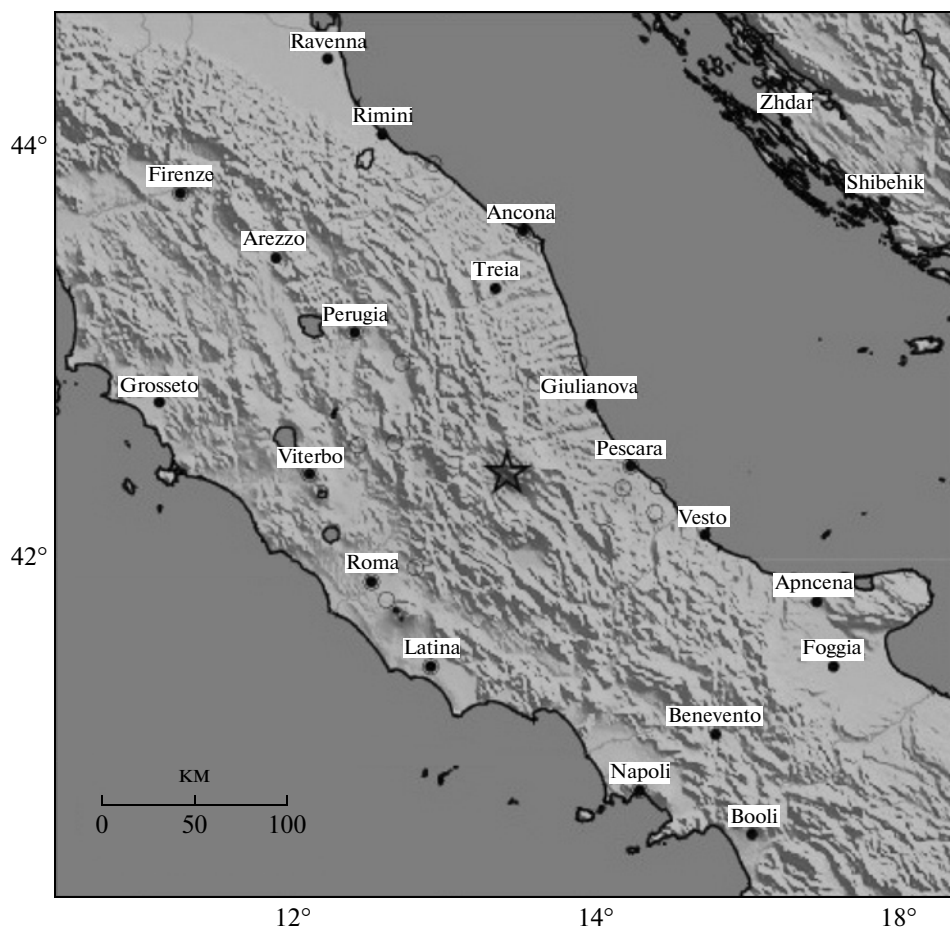


Рис. 3. Фрагмент географической карты Италии. Звездочкой отмечено положение эпицентра землетрясения 06.04.2009 г. в Л'Аквиле. (Взято с сайта <http://earthquake.usgs.gov>).

той ст. Рим. Станция Grahamstown находится на южной оконечности Африки, и ее местное время на час опережает местное время на ст. Рим. На этих станциях также отсутствуют значимые отклонения на том же самом иллюстрируемом временном интервале. Более того, анализ показал отсутствие соответствующих значимых отклонений на всех шести станциях с 01.04.2009 г. по 07.04.2009 г., за исключением отмеченного выше 5.04.2009 г. вблизи 04:00 UT на ст. Рим. В таблице приведены значения вычисленных коэффициентов корреляции (ρ) для каждого из трех дней (с

4 апреля 2009 г. по 6 апреля 2009 г.) между суточными временными рядами значений $foF2$ (число точек $N = 96$, уровень значимости 0.05) соответствующих станций.

Из таблицы видно, что за сутки до землетрясения 06.04.2009 г. в Л'Аквиле происходит заметное уменьшение коэффициента корреляции между ст. Rome и контрольными станциями Pruhonice, Juliusruh и Dourbes, находящимися с ней в одном европейском регионе. В то же время, за эти дни нет заметных изменений значений коэффициентов корреляции между самими контрольными

Величины коэффициентов корреляции ρ между суточными временными рядами значений $foF2$ соответствующих станций за период с 04.04.2009 г. по 06.04.2009 г.

Дни	ρ				
	Rome–Pruhonice	Rome–Juliusruh	Rome–Dourbes	Pruhonice–Juliusruh	Pruhonice–Dourbes
04.04.2009 г.	0.88	0.84	0.83	0.91	0.93
05.04.2009 г.	0.85	0.80	0.74	0.91	0.92
06.04.2009 г.	0.90	0.85	0.86	0.94	0.92

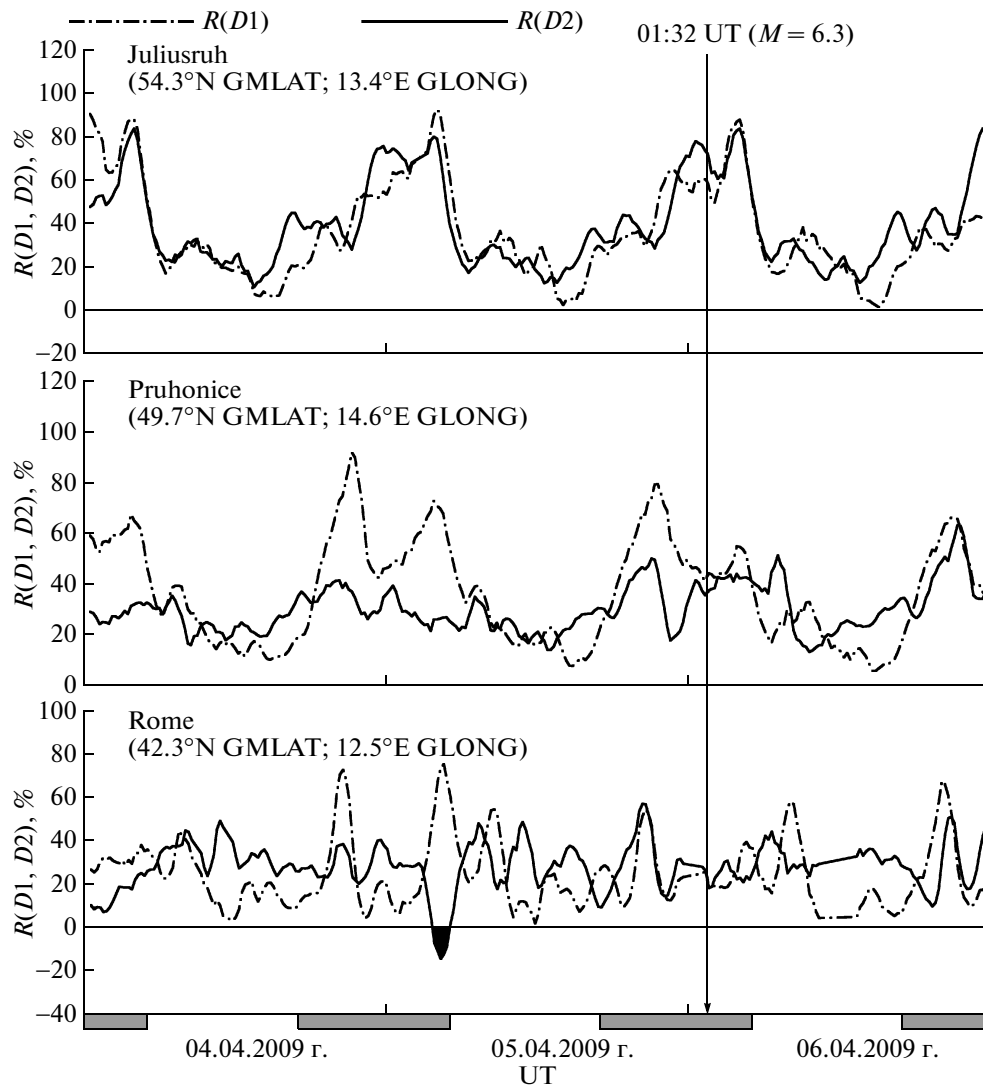


Рис. 4. Временные вариации скользящего среднего параметров $R(D1, D2)$ для станций Rome, Pruhonice и Juliusruh с 04.04.2009 г. по 06.04.2009 г. Сплошная линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, а затененные прямоугольники под осью абсцисс на нижней панели показывают интервалы местного времени от 18:00 LT до 06:00 LT. Зачерненный участок кривой $R(D2)$ для ст. Rome соответствует предполагаемому сейсмо-ионосферному эффекту.

станциями, при этом степень корреляции между контрольными станциями очень высокая. Такая сравнительная картина между данными непосредственных измерений также свидетельствует в пользу существования локализованных возмущений в области F ионосферы над ст. Rome за сутки до землетрясения.

В работе [Liu et al., 2006] для выделения сейсмо-ионосферных аномалий (предвестников землетрясений) в поведении $foF2$ была использована методика, в которой не используются предположения о характере распределения величин $foF2$ в исследуемых выборках, и, в качестве “аномальных”, рассматриваются те значения $foF2$, которые лежат выше или ниже контрольной медианы, выходя за пределы половины разницы между

третьим и первым квартилями распределений соответствующей выборки (semi-interquartile range—SIQR). С целью дополнительной проверки обнаруженного сейсмо-ионосферного возмущения над Римом было проведено сравнение результатов, полученных по нашей схеме, с теми, которые дает метод [Liu et al., 2006], модифицированный в сторону ужесточения правила отбора к величине аномалии, т.е. увеличения ширины “шумовой дорожки”, которая при такой модификации представляет собой размах контрольной выборки ($foF2_{min}$ и $foF2_{max}$) для каждой точки, а не SIQR. Это сравнение иллюстрирует рис. 6, где на интересующем нас интервале времени представлены временные ходы (также с усреднением по пяти точкам) над ст. Rome текущего значения $foF2$,

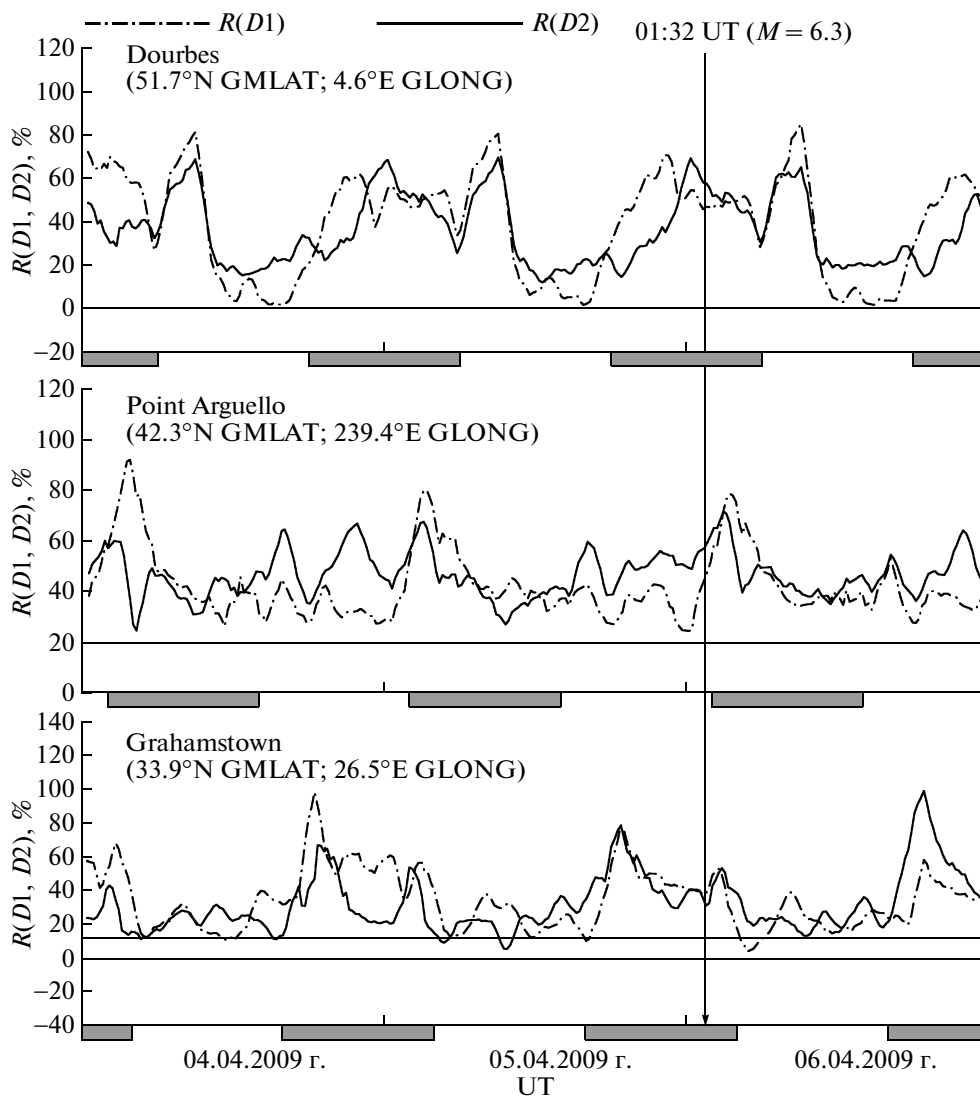


Рис. 5. То же, что и рис. 3, но для контрольных станций Dourbes, Point Arguello и Grahamstown.

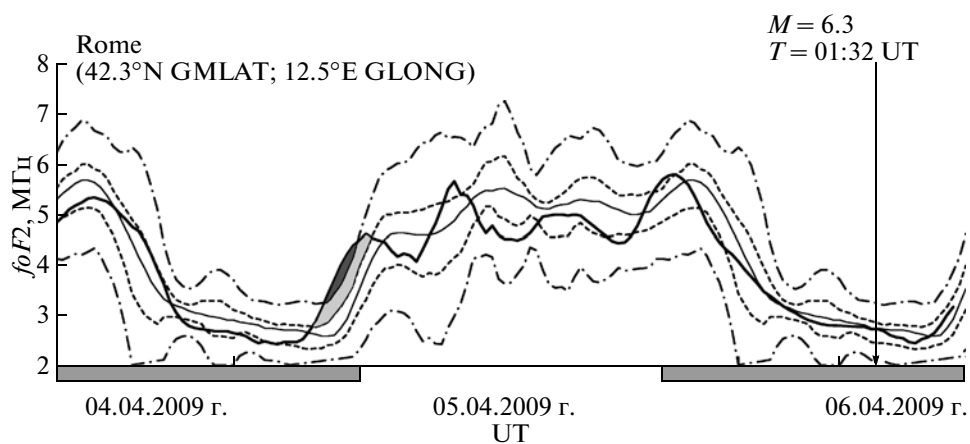


Рис. 6. Временные вариации (с усреднением по пяти точкам исходных пятнадцатиминутных данных) над ст. Rome текущего значения $foF2$ (толстая сплошная линия), $foF2_{\text{мед}}$ (тонкая сплошная линия), $foF2_{\text{min}}$ и $foF2_{\text{max}}$ (штриховые линии) и $foF2_{\text{cp}} \pm 4\sigma$ (штрих-пунктир). Стрелкой отмечен момент землетрясения, а затемненные прямоугольники под осью абсцисс отмечают локальные ночные часы.

$foF2_{\text{мед}}$, $foF2_{\text{min}}$ и $foF2_{\text{max}}$, а также заданные нами ранее границы “шумовой дорожки” $foF2_{\text{cp}} \pm 4\sigma$. В соответствии с выводами работы [Klotz and Johnson, 1983] они соответствуют примерно $foF2_{\text{мед}} \pm 6\text{SIQR}$ и накладывают значительно более жесткие ограничения на величину $foF2$, которая может быть принята за сейсмо-ионосферное возмущение, по сравнению с критерием, использованным в работе [Liu et al., 2006]. Стрелкой отмечен момент землетрясения, а затемненные прямоугольники под осью абсцисс отмечают локальные ночные часы. Видно, что только в интервале времени ~03:30–05:00 UT 5 апреля 2009 г. (зачерненная область между толстой сплошной линией и верхней пунктирной линией) текущее значение $foF2$ превышает верхнюю границу “шумовой дорожки” $foF2_{\text{cp}} + 4\sigma$. Приблизительно в 04:15 UT 5 апреля 2009 г. наблюдается максимальное относительное превышение $foF2_{\text{мед}}$ текущим значением $foF2$, которое составляет 56%. Превышение текущим значением $foF2$ верхней границы размаха $foF2_{\text{max}}$ (светло-серая и черная области на рисунке) начинается несколько ранее и длится чуть более двух часов. Таким образом, проведенная проверка на основе модифицированного метода [Liu et al., 2006] полностью подтверждает полученный выше результат.

Обнаружение ионосферного предвестника землетрясения в $F2$ -слое ионосферы в виде заметного увеличения электронной концентрации в максимуме слоя в ночные часы местного времени с длительностью порядка часов согласуется также с предположением о возмущении ночной области F ионосферы квазистатическим полем сейсмического источника, генерирующимся перед сильным землетрясением в его эпицентральной области на поверхности земли и проникающим на ионосферные высоты в высоких и средних широтах [Kim and Hegai, 1999].

Подводя итоги обсуждения, можно определенно утверждать, что в процессе подготовки сильного землетрясения в Л'Аквиле 06.04.2009 г. за 20 ч до землетрясения в течение почти полутора часов наблюдалось четко выраженное неслучайное локализованное возмущение в ионосферном $F2$ -слое над ст. Rome, расположенной в 85-ти км от эпицентра землетрясения, которое можно идентифицировать как возможный ионосферный предвестник этого землетрясения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа временных рядов пятнадцатиминутных значений критических частот $F2$ -слоя ионосферы $foF2$ ряда наземных станций вертикального зондирования ионосферы в очень спокойных геомагнитных условиях и низкой солнечной активности получено, что приблизительно за 20 ч до разрушительного землетрясения,

произошедшего 06.04.2009 г. в Л'Аквиле, над ст. Rome, расположенной вблизи от эпицентра землетрясения, наблюдалось локализованное статистически значимое положительное возмущение $foF2$ длительностью около полутора часов. При этом на удаленных от эпицентра землетрясения 5-ти контрольных станциях за аналогичный период наблюдения статистически значимых отклонений $foF2$ от фоновых значений выявлено не было, что дает основание рассматривать наблюдавшийся на ст. Rome эффект увеличения $foF2$ в качестве возможного ионосферного предвестника данного землетрясения.

Авторы выражают благодарность NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) USA за предоставленную возможность использовать имеющийся у них банк ионосферных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Легенька А.Д., Хегай В.В., Ким В.П.* Сравнение вариаций критической частоты $F2$ -области перед сильными итальянскими землетрясениями и в период магнитной бури по данным станций наземного вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 4. С. 563–570. 2007.
- *Хегай В.В., Легенька А.Д., Ким В.П.* Сравнительный анализ возмущений в среднеширотной $F2$ -области ионосферы во время сильной и экстремальной магнитных бурь марта 2001 г. по данным магнито-сопряженных наземных ионосферных станций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 5. С. 628–638. 2009.
- *Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pageoph. № 117. P. 1025–1044. 1979.
- *Kim V.P., Hegai V.V.* A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude $F2$ region ionosphere // Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB). P. 619–627. 1999.
- *Klotz S., Johnson N.L.* (Eds.) Encyclopedia of Statistical Sciences / John Wiley, Hoboken, N.J. 1983.
- *Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.* A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. A05304. doi:10.1029/2005JA011333. 2006.
- *Liu J.Y., Chen Y.I., Chen C.H., Liu C.Y., Chen C.Y., Nishihashi M., Li J.Z., Xia Y.Q., Oyama K.I., Hattori K., Lin C.H.* Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake // J. Geophys. Res. V. 114. N. A04320, doi:10.1029/2008JA013698. 2009.
- *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric Precursors of Earthquakes // Berlin: Springer, 315 p. 2004.
- *Zhao B., Wang M., Yu T., Wan W., Lei J., Liu L., Ning B.* Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? // J. Geophys. Res. V. 113. № A11304, doi:10.1029/2008JA013613. 2008.