

СРАВНЕНИЕ ВАРИАЦИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ПЕРЕД СИЛЬНЫМ ИТАЛЬЯНСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ВБЛИЗИ РИМА И В ПЕРИОД МАГНИТНОЙ БУРИ

COMPARISON OF foF2 VARIATIONS OBSERVED PRIOR TO MAJOR EARTHQUAKE IN ITALY NEAR ROME AND DURING A MAGNETIC STORM

А. Д. Легенька, В. В. Хегай, В. П. Ким

Институт земного магнетизм, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, (ИЗМИРАН), leg@izmiran.rssi.ru

We have examined time variations of the critical frequency foF2 for low geomagnetic activity before major earthquake ($M = 6.0$) which occurred in Italy on January 7, 1962 near Rome and during the geomagnetic storm of January 10, 1962 using measurements from several ground-based ionosondes. It is found that there took place noticeable (more than 1.5 the standard deviation) transient perturbations of foF2 with respect to the foF2 monthly median from about 24 to several hours before the earthquakes over the restricted region (with horizontal dimensions of the order of 500 km) around the earthquake epicenter. During the magnetic storm, severe disturbances of the F region peak electron density were observed on a global scale. Peak magnitudes of the foF2 disturbances associated with the storm by more than a factor of 3 exceed those ones measured before the earthquakes at the same locations. We suggest that the foF2 perturbations preceding the earthquake are likely initiated by some pre-earthquake seismic activity.

Современные научные исследования проявления сейсмической активности в атмосфере Земли на высотах ионосферы ведутся, в основном, по двум направлениям - изучение возмущений в ионосфере в связи с отдельными землетрясениями (case study) и получение некоторых усредненных характеристик процессов сейсмо-ионосферного взаимодействия на основе статистического анализа выбранного ряда землетрясений. В конечном итоге целью этих исследований является создание максимально широкой эмпирической базы данных, на основе которой можно будет достаточно надежно верифицировать выдвигаемые физические механизмы литосферно-ионосферного взаимодействия, и далее пытаться строить алгоритмы, пригодные для перехода к задачам прогнозирования землетрясений по ионосферным данным или с их учетом. В настоящем исследовании мы сосредоточили все внимание на поиске только КРАТКОСРОЧНЫХ ионосферных предвестников землетрясений, которые могут проявляться в интервале порядка суток-часов до момента толчка, т.к. именно проблема выявления краткосрочных (сутки-часы) предвестников землетрясений стоит наиболее остро (с точки зрения практического использования их в задачах прогнозирования). Наличие взаимосвязи между динамикой литосферных процессов и вариациями ионосферных параметров в настоящее время в значительной степени обосновано как теоретически (см., например, [1,2]), так и морфологически [3-5]. Однако выделить эти возмущения на фоне воздействия других факторов (в частности, солнечно-магнитосферного происхождения) довольно трудно, так как сейсмо-ионосферные вариации в критических частотах foF2, в основном, имеют амплитуду около 15-20% и менее относительно месячной медианы, а вариации, вызванные

магнитными возмущениями, как правило, больше. Таким образом, при выделении предполагаемых сейсмо-ионосферных вариаций, особенно на фазе подготовки землетрясения ("предвестников"), необходимо учитывать конкретную геофизическую ситуацию, и, прежде всего, геомагнитную активность.

В настоящей работе приведены результаты анализа изменений критической частоты слоя F2 (foF2) в период подготовки землетрясения, имевшего место в регионе

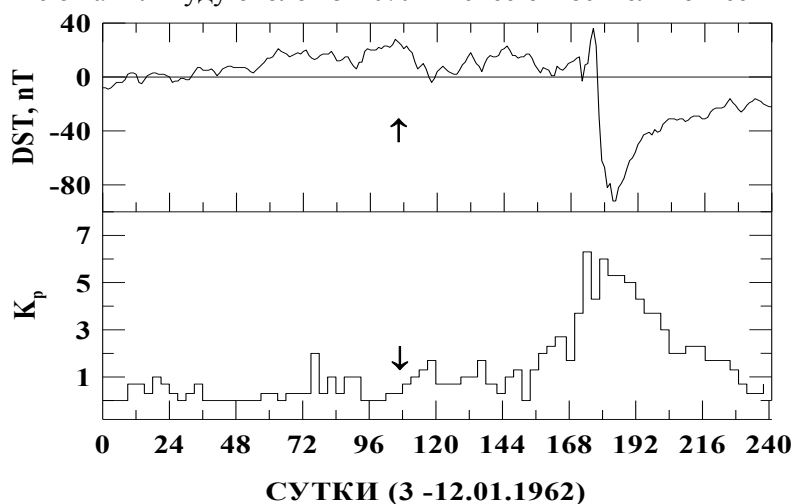


Рис. 1. Суточные DST вариации (верхняя панель) и 3-х часовые K_p -индексы (нижняя панель) для периода с 3 по 12 января 1962 г. Момент подземного толчка указан стрелкой.

станции наземного вертикального зондирования ионосферы "Рим" (расстояние от эпицентра до станции $R \leq 500$ км) на основе подхода, подробно описанного в работе [6], где в качестве меры ионосферного возмущения принимается величина стандартного отклонения (d) от месячной медианы критической частоты F2-слоя ($f_{\text{мед}}$). При этом удалось по единой методике провести сравнение сейсмо-ионосферных возмущений, связанных с землетрясением, произошедшим на спокойном геомагнитном фоне (дата события 7.01.1962 г.) и вариациями ионосферы, обусловленными умеренной магнитной бурей, начавшейся 10.01.1962 г.

Землетрясение, в период подготовки которого были выделены вероятные сейсмо-ионосферные эффекты (эпигноз "предвестников"), произошло 7 января 1962 г. в 10:03 UT, (географическая широта $\varphi = 43.3^\circ\text{N}$, географическая долгота $\lambda = 17.1^\circ\text{E}$, $M = 6.0$). Радиус зоны подготовки для землетрясений обычно оценивается по формуле Добровольского $\rho = 10^{0.43M}$, где ρ - радиус зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли в км, а M - магнитуда землетрясения [7]. В рассматриваемом случае $\rho = 380$ км.

Для анализа сейсмического воздействия на ионосферу Земли привлекались данные измерений критической частоты foF2 станций наземного вертикального зондирования ионосферы (НВЗИ) Европейского сектора. Самой близкой к эпицентру была ст. "Рим", а данные других станций привлекались в качестве контрольных для изучения ситуации в ионосфере в рассматриваемые периоды.

Изменения DST и K_p - индексов, характеризующие уровень геомагнитной возмущенности за период с 1 по 5 апреля 1998 г. приведены на Рис. 1 (верхняя и нижняя панели соответственно). Стрелки отмечают момент подземного толчка. Хорошо видно, что в рассматриваемый период, т.е. за 5 суток до подземного толчка геомагнитная активность была очень низкой, значения K_p -индекса не превышали 2. В течение суток до землетрясения значения DST-индекса колеблются в окрестности нуля, а K_p в этот период снижается до величины 2. Таким образом, геомагнитный фон за сутки до землетрясения становится очень низким. Рост магнитной активности начинается с полудня 9 января по K_p -индексу и 10 января в 08:10 UT достигается максимальное значение K_p -индекса, равное шести, одновременно с положительным SC-пиком в DST-индексе, экстремум отрицательной фазы бури по DST-индексу (-92 nT) наблюдается 10 января в 16-17 UT при высоких значениях K_p -индекса ($K_p = 5$), затем начинается плавное понижение K_p -индекса с характерным для фазы восстановления стремлением DST-индекса к нулевой отметке. К концу наблюдаемого периода, 12 января значения $K_p \leq 2$ и регистрируется низкий фон планетарной геомагнитной активности. Сильный подземный толчок произошел на очень низком фоне геомагнитной активности. Следует отметить, что весь январь 1962 г. был достаточно магнито-спокойным, т. к. в течение всего месяца наблюдалась только одна умеренная магнитная буря (10-11.01).

Для выделения сейсмо-ионосферных эффектов по данным НВЗИ за спокойный фон чаще всего принимается медиана $f_{\text{мед}}$ (месячная или скользящая), а отклонения от нее (δfoF2 , % = $[\text{foF2}_{\text{текущее}} - f_{\text{мед}}] \times 100 / f_{\text{мед}}$), при определенных условиях, рассматриваются как предвестники. Для более корректного выделения аномальных изменений foF2, в соответствии с [6], нами было

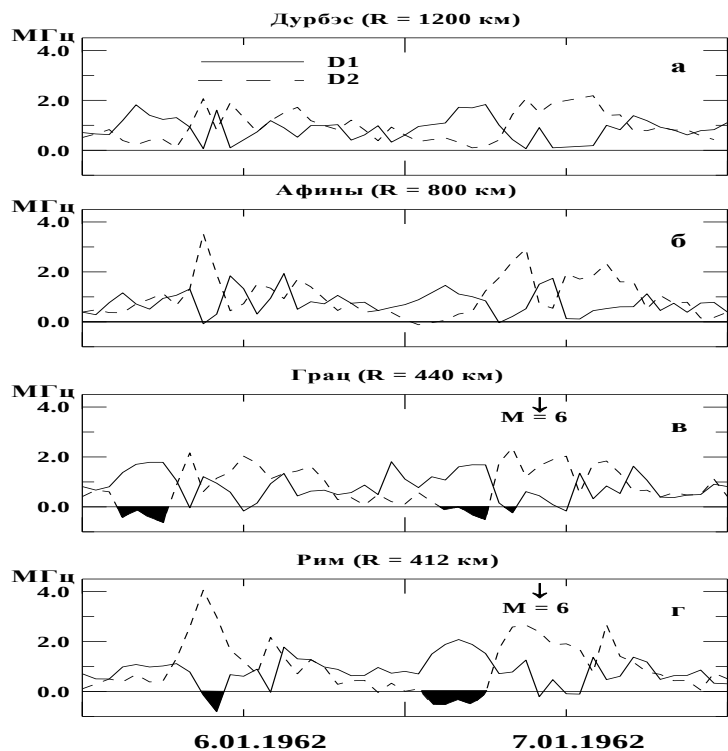


Рис. 2. Вариации параметров отклонения D1 и D2 на контрольных станциях «Дурбэс» и «Афины», находящихся на значительном удалении от эпицентра (а), (б) и опорных станций «Грау» и «Рим», расположенных в области подготовки землетрясения (в), (г). Стрелками отмечен момент толчка с указанием величины магнитуды землетрясения, зачерненные участки кривых отмечают ионосферные предвестники землетрясения.

проведено сравнение поведения специальных параметров отклонения D1 и D2 по данным станции «Рим» и ряда контрольных станции, удаленных от эпицентра землетрясения:

$D1 = foF2 - (f_{мед} - 1.5d)$, и $D2 = (f_{мед} + 1.5d) - foF2$, где $f_{мед}$ – месячная медиана, а d – стандартное отклонение. Если становится отрицательным параметр D1, то это соответствует уменьшению $foF2$ по сравнению с $f_{мед}$ на величину, превышающую стандартное отклонение более чем в полтора раза, а если становится отрицательным параметр D2, критическая частота слоя F2 ($foF2$) превышает $f_{мед}$ на величину, также большую, чем $1.5d$. Анализ данных по ст. «Рим» показывает, что на фоне очень спокойной геомагнитной обстановки примерно за сутки и за несколько часов до подземного толчка отмечаются аномальные изменения $foF2$, которые могут быть краткосрочными предвестниками землетрясения. За сутки до землетрясения наблюдалось дневное (6.01 в 8:00-13:00 UT) уменьшение $foF2$ ($\delta foF2 \approx -20\%$), а за несколько часов – ночное (7.01 в 2:00-5:00 UT) увеличение $foF2$ ($\delta foF2 \approx +12\%$) по сравнению с их месячными медианными значениями, такое поведение критической частоты F2-слоя перед землетрясением хорошо согласуется с результатами работы [8], где приведены результаты зависимости сейсмоионосферных возмущений от местного времени.

Вариации D1 и D2 по данным контрольных ст. «Дурбэс» ($R = 1213$ км) и «Афины» ($R = 804$ км) и опорных станций «Грац» ($R = 440$ км) и «Рим» ($R = 412$ км) для рассматриваемого интервала времени в течение двух суток показаны на Рис. 2(а, б) и 2(в, г) соответственно.

Видно, что эффекты, отнесенные к предвестникам землетрясения, хорошо проявляются в суточных распределениях D1 и D2 и на рисунках отмечены зачерненными участками соответствующих кривых. Возмущения, значительно выходящие за пределы $1.5d$, и которые могут быть предвестниками землетрясения, по ст. «Рим» отмечаются примерно за сутки до подземного толчка, т.е. 6.01.1962 г. в 10:00 UT в виде уменьшения $foF2$ ($D1 = -0.8$ МГц) и в виде увеличения критической частоты F2-слоя 7.07.1962 г. в период с 2:00 до 5:00 UT ($D2 = -0.52$ МГц). Эффекты, связанные с землетрясением, которые наблюдались по данным ст. «Рим», отмечаются также в

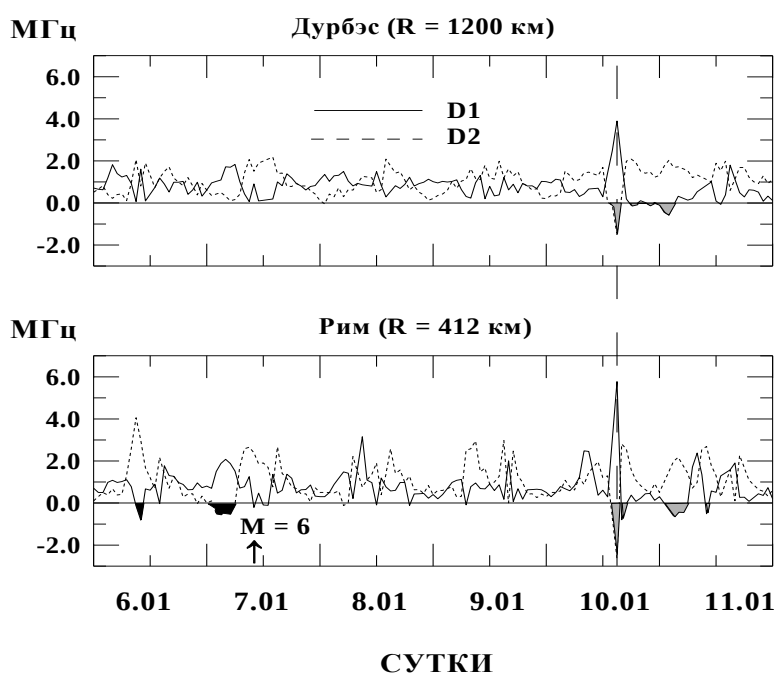


Рис. 3. Суточные распределения параметров D1 и D2 на опорной станции «Рим» (нижняя панель) и контрольной станции «Дурбэс» (верхняя панель). Над панелями даны эпицентральные расстояния до станций. Момент толчка отмечен стрелкой с указанием величины магнитуды, а экстремум развития магнитной бури по DST-индексу (-92 nT) указан штриховой вертикальной линией. Сейсмоионосферные возмущения отмечены зачерненными участками соответствующих кривых, а вариации связанные с магнитной бурей – серым тоном.

близкие к указанным моменты времени и на ст. «Грац» ($R = 440$ км), которая расположена севернее эпицентра и на 28 км дальше от эпицентра, чем станция «Рим». Величина сейсмоионосферных возмущений на этой станции несколько меньше. В суточных распределениях D1 и D2 по данным контрольных станций «Дурбэс» ($R = 1200$ км) и «Афины» ($R = 800$ км) значимых возмущений не наблюдается.

Рассмотрим теперь эффекты в слое F2, вызванные магнитной бурей, последовавшей через 2 дня после подземного толчка. Анализ проведен так, чтобы одновременно видны были выделенные ранее сейсмоионосферные возмущения и возмущения, вызванные рассматриваемой магнитной бурей. Как известно, возмущения от магнитных бурь в ионосфере по своей максимальной абсолютной величине изменений $foF2$, как правило, превышают сейсмоионосферные возмущения. На Рис. 3 в качестве иллюстрации показаны суточные распределения параметров D1 и D2 с 6 по

11.01.1962 для опорной ст. «Рим» (нижняя панель) и контрольной ст. «Дурбэс» (верхняя панель). Этот временной интервал охватывал как интервал подготовки и реализации сейсмического события (6-7 января), так и период магнитной бури (10-11 января).

По данным ст. «Рим» наблюдалось положительное возмущение foF2, обусловленное развитием бури, и 10.01.1962 г. в 15:00 UT отрицательное отклонение параметра D2 достигло экстремума -2.6 МГц, далее последовало отрицательное возмущение, когда уже D1 оказалось равным -0.79 МГц. Таким образом, на одной и той же станции максимальная абсолютная величина возмущения в ионосфере, обусловленная умеренной бурей ($K_p^{\max} = 6$) более чем в три раза превзошла максимальное сейсмо-ионосферное возмущение ($D1 = -0.8$ МГц). Аналогичные ионосферные возмущения, связанные с магнитной бурей, также хорошо видны и по данным контрольной ст. «Дурбэс». Такие же положительные и отрицательные возмущения наблюдались по данным других рассматриваемых станций Европейского региона (ст. «Линдау», «Афины», «Грац» и «Пругоница») в период этой бури почти синхронно, что отражает ПЛАНЕТАРНЫЙ характер воздействия магнитной бури на ионосферу, в то время как сейсмо-ионосферные возмущения, как это видно из нашего рассмотрения, проявляются только ЛОКАЛЬНО, вблизи станций, входящих в область его подготовки, радиус которой для последнего случая оказался даже несколько больше, чем это следует из оценки по формуле Добровольского. Сейсмо-ионосферные эффекты наблюдаются на ст. «Рим» ($R = 412$ км) и «Грац» ($R = 440$ км), тогда как формула Добровольского для магнитуды $M = 6$ дает величину 380 км для радиуса зоны подготовки.

Кратко сформулируем основные выводы работы:

1. Проведено исследование ионосферных возмущений, связанных с сильным землетрясением, произошедшим в регионе Италии 7.01.1962 на фоне низкой геомагнитной активности, и умеренной магнитной бурей, протекавшей в период с 10.01.1962 по 11.01.1962.

2. Анализ поведения критической частоты foF2 для расположенной наиболее близко к эпицентру землетрясения станции «Рим» показал, что для этого землетрясения за сутки и часы до события на геомагнитно-спокойном фоне надежно выделяются отклонения от месячной медианы, более чем в полтора раза превышающие стандартное, которые, по-видимому, являются ионосферными предвестниками землетрясения, так как возмущений значимой величины в те же моменты времени не наблюдается на контрольных станциях европейской сети, находящихся на значительном удалении от эпицентра ($R \sim 1000$ км).

3. Изучение поведения критических частот foF2 для землетрясения, произошедшего 7.01.1962, позволило рассмотреть по единой методике как эффекты, возникающие в период подготовки землетрясения в спокойной геомагнитной обстановке, так и вызванные магнитной бурей, которая началась 10.01.1962 г. Показано, что выделенный предвестниковый сейсмо-ионосферный эффект землетрясения, локализован в области с эпицентральной дистанцией порядка 500 км, в то время как возмущения, вызванные магнитной бурей, имеют планетарный характер. Максимальная амплитуда сейсмо-ионосферных возмущений foF2 в три раза меньше по сравнению с максимальными вариациями, обусловленными магнитной бурей, однако по абсолютной величине они более чем в 1.5 раза превышают стандартное отклонение от месячной медианы.

Литература

1. Пулинец С. А., Хегай В. В., Боярчук К. А., Ломоносов А. М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. Т.41. N5. С. 582-589. 1998.
2. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A. "Ionospheric Precursors of Earthquakes". Springer, Berlin, Germany, 2004. 315p.
3. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
4. 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. N3. С. 240-249. 2003.
5. Легенька А. Д., Пулинец С. А., Хегай В. В. Каталог сейсмо-ионосферных предвестников по данным наземного и спутникового зондирования ионосферы. Препринт N1(1156). Ч.1. ИЗМИРАН. 2004. 31 с.; Препринт N1(1157). Ч.2. М.: ИЗМИРАН. 2004. 35 с.
6. Rios V. H., Kim V. P., Hegai V. V. Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the Great San Juan Earthquake of 23 November 1977 // Adv. Space Res. V. 33. N3. P. 323-327. 2004.
7. Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pageoph. N 117. P. 1025 - 1044. 1979.
8. Пулинец С. А., Легенька А. Д., Зеленова Т. И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагн. аэрономия. Т. 38. N3. С.178-183. 1998.