

5. References

- Berthelier, J.J., M. Godefroy, F. Leblanc, M. Malingre, M. Menvielle, D. Lagoutte, J.Y. Brochot, F. Colin, F. Elie, C. Legendre, P. Zamora, D. Benoist, Y. Chapuis, J. Artru, R. Pfaff, ICE, the electric field experiment on DEMETER, Planetary and Space Science, 2006. 54. P. 456-471.
- Boudjada, M.Y., F. Genova, The left-hand polarization sense of the Jovian decameter radiation, Astronomy and Astrophysics Supplements series, 1991. 91. P. 453-467.
- Boudjada, M.Y., H.O. Rucker, P.H. Ladreiter, The Io-C Jovian decameter emissions, Astronomy and Astrophysics, 1995. 303. P. 255-264.
- Gokhberg, M.B., Morgunov, V.A., Yoshino, T., Tomizawa, I., Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan. J. Geophys. Res. 1982. 87, 7824-7828.
- Hayakawa, M., Molchanov, O.A. Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, 2002.
- Meloni, A., Spichak, V.V., Uyeda, S. Magnetic, electric and electromagnetic methods in seismology and volcanology, Ann. Geophys. 2004. 47 (1).
- Parrot, M., Electromagnetic noise due to earthquakes. In: Volland, H. (Ed.), Handbook of Atmospheric Electrodynamics, vol. II. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996. P. 95-116.
- Pulinets, S.A., Boyarchuk, K.A., 2004. Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer, New York., 2004.
- Warwick, J.W., Stoker, C., Meyer, T.R., 1982. Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960. J. Geophys. Res. 1982. 87. P. 2851-2859.

О ВОЗМУЩЕНИЯХ foF2 В СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

foF2 DISTURBANCES IN MIDDLE LATITUDE IONOSPHERE BEFORE STRONG EARTHQUAKES

*Е.В. Липеровская¹, М. Парро², В.В. Богданов³, К.В. Мейстер⁴,
М.В. Родкин⁵, В.А. Липеровский¹*

¹*Институт физики земли РАН,*

²*L.P.C.E./C.N.R.S., 45071 Орлеан, Франция,*

³*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

⁴*Астрофизический институт, Потсдам, Германия,*

⁵*Геофизический Центр РАН*

Within the last years in a series of works the deflection of character of ionospheric foF2 frequency from its median values during earthquake preparation has been studied in connection to the problem of earthquake prognosis. It has been found out that the modification of foF2 does not take place before all earthquakes. Thus it was interesting to carry out statistical investigations and to pick out a part of events which have been accompanied by noticeable anomaly variations in the F-region.

In this work the statistical investigations of ionospheric effects before strong earthquakes are carried out by the use of data from 4 Japanese stations of vertical sounding. The statistical analysis of the variations of the averaged diurnal frequency of the maximum ionospheric electron density foF2 is performed in connection to the occurrence of some tens of earthquakes with magnitudes $M > 6.0$, depths $h < 80$ km and distances from the vertical sounding station $R < 1000$ km. It is shown that, on the average, foF2 decreases a few days before the earthquakes. The decrease amounts in average to about 5 % a day of the shock.

Введение

В ряде работ проводились исследования поведения характеристик ионосферы в связи с подготовкой землетрясений. Ионосферный слой F самый динамичный из регулярных слоев, он более всего подвержен изменениям, связанным с различными

причинами, а критическая частота слоя $foF2$ является одним из наиболее регулярно измеряемых параметров при вертикальном зондировании (ВЗ). Эта частота соответствует плазменной частоте максимума плотности ионизации ионосферы. В ряде работ разные авторы проводили поиск вариаций среднесуточных характеристик $foF2$, которые могли бы быть предвестниками достаточно сильных землетрясений [1, 7, 9]. Однако вопрос оказался сложнее и среднесуточные характеристики $foF2$, по-видимому, заметно изменяются только при очень сильных землетрясениях. При этом было неясно, начиная с каких магнитуд землетрясений можно ожидать заметных изменений в среднесуточных характеристиках $foF2$ перед землетрясениями. Анализ вариаций усредненных по различным частям суток значений $foF2$ с целью поиска предвестников землетрясений был проведен в ряде работ. В работах [1, 6, 8, 9, 3] было обнаружено уменьшение $foF2$ за сутки-двое до землетрясений с $M > 6$. С другой стороны, в работе [7] отмечено увеличение $foF2$ перед несколькими очень сильными землетрясениями. Далее статистическое исследование уменьшения послеполуденных значений $foF2$ перед тайваньскими землетрясениями с магнитудами $M > 5$ проведено в [5].

В настоящей работе проведен статистический анализ вариаций среднесуточных $foF2$ во временной окрестности \pm две недели до и после японских землетрясений с магнитудами $M > 6.0$. Цель работы – выяснить вопрос, для какой доли событий прослеживаются заметные модификации среднесуточных значений $foF2$ в связи с землетрясениями. Для анализа были использованы часовые данные за 1957-1990 по 4 ионосферным станциям.

Метод анализа

Для анализа $foF2$ до и после землетрясений в настоящей работе рассмотрены японские землетрясения с магнитудами $M > 6.0$, глубиной очага $h < 80$ км и расстояниями от эпицентра до станции вертикального зондирования $R < 1000$ км. Ионосферные данные взяты в ИНТЕРНЕТе <http://www.rl.ac.uk.wdccc1/data.html> (станции «Вакканай» ($\varphi=45.2^\circ\text{N}$, $\lambda=141.4^\circ\text{E}$, 1957-1988 гг.), «Акита» ($\varphi=39.4^\circ\text{N}$, $\lambda=140.1^\circ\text{E}$, 1957-1988 гг.), «Токио» (Кокубунжи) ($\varphi=35.7^\circ\text{N}$, $\lambda=139.5^\circ\text{E}$, 1957-1990 гг.) и «Ямагава» ($\varphi=31.1^\circ\text{N}$, $\lambda=130.4^\circ\text{E}$, 1957-1988 гг.). За рассмотренные интервалы времени в радиусе $R < 1000$ км от каждой станции произошло несколько десятков землетрясений.

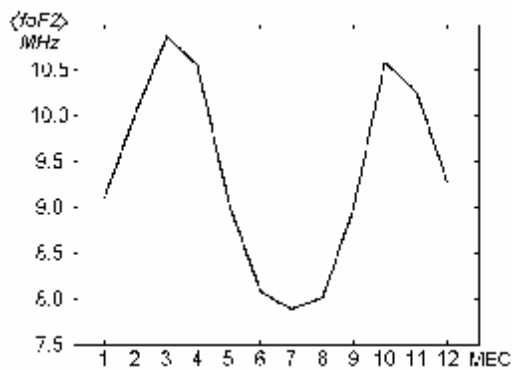


Рис.1. Сезонный ход среднесуточных значений $\langle foF_2 \rangle$.

В ходе критической частоты $foF2$ наблюдается сильная суточная и сезонная зависимость, кроме того, эта частота зависит от фазы 27-дневных солнечных суток и фазы 11-летнего солнечного цикла. В настоящей работе анализировались среднесуточные значения $\langle foF_2 \rangle$.

Сезонный ход $\langle foF_2 \rangle$, полученный по данным станции Токио усреднением по всему анализируемому интервалу, представлен на рис. 1.

На реальный сезонный ход накладываются вариации, вызванные изменением солнечной активности в связи с 27 дневными солнечными сутками. Эти вариации особенно заметны в годы, близкие к годам максимума 11 летнего цикла солнечной активности. Чтобы уменьшить влияние глобальных факторов, в работе рассматриваются сравнительно короткие интервалы времени во временной окрестности землетрясений и при анализе принимаются во внимание только дни, когда солнечная активность не слишком велика. Возмущения геомагнитного поля также влияют на поведение $foF2$,

поэтому при исследовании ионосферных эффектов землетрясений отбирались только те сутки, при которых геомагнитные возмущения также были не слишком большие. Единой точки зрения по этому вопросу нет. В данной работе при наложении эпох были наложены ограничения – принимались в рассмотрение только дни, в которые индекс Вольфа меньше 100 и $\Sigma Kp < 30$, при таких ограничениях более половины всех имеющихся данных может быть использовано для анализа.

Для каждого землетрясения рассматривался интервал (-13, +13) суток до и после события, значения $\langle foF_2 \rangle_i$ за каждые сутки (i) нормировались на среднее за весь интервал

$\langle foF_2 \rangle_{total}$. В результате был получен ряд из 27 безразмерных величин (в %) $\Delta F(i) = \frac{\langle foF_2 \rangle_i - \langle foF_2 \rangle_{total}}{\langle foF_2 \rangle_{total}} 100\%$ для каждого землетрясения. Землетрясение

принималось во внимание, только если имелись в наличии данные не менее чем за 14 дней из 27. Отметим, что из-за того, что интервалы до и после события достаточно короткие и одинаковые – по 13 дней, влияние сезонного хода foF_2 сравнительно невелико.

Далее была проведена процедура наложения эпох для 27 дневных интервалов в окрестности землетрясений для всех рассмотренных землетрясений, и таким образом получены средние величины $\overline{\Delta F(i)}$ за каждый день. Аналогичные исследования вариаций foF_2 для сильных землетрясений были проведены по материалам других японских станций – Акита, Вакканай и Ямагава. На рисунке 2 представлены результаты анализа. Полученные в результате наложения эпох функции $\overline{\Delta F(i)}$ приведены на соответствующих рисунках для каждой станции. Таким образом, на всех станциях наблюдается уменьшение foF_2 во временной окрестности за несколько суток до и сутки-двое после землетрясений.

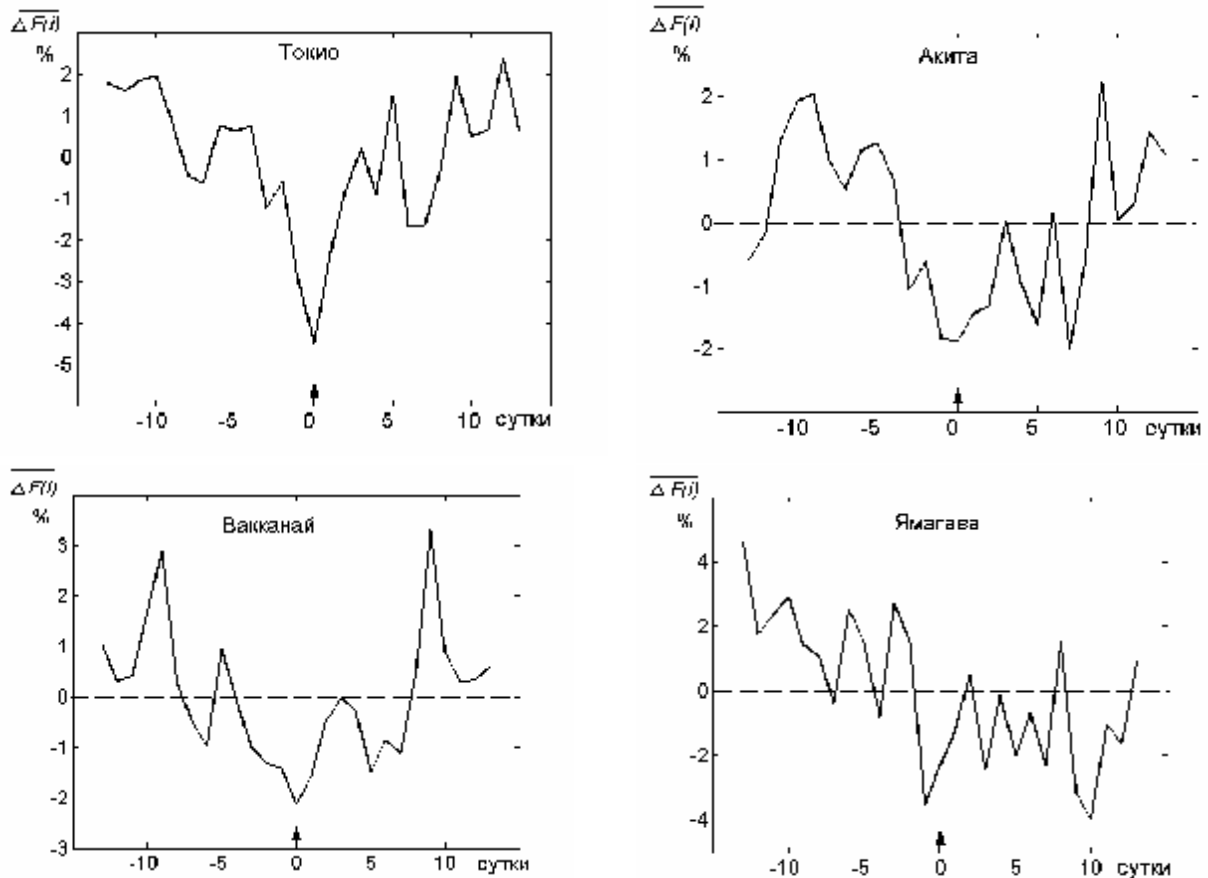


Рис.2. $\overline{\Delta F(i)}$ – Результат наложения эпох для нормированных foF_2 . При анализе принимались во внимание землетрясения с магнитудами $M > 6.0$, расстояниями от эпицентра до станции ВЗ $R < 1000$ км и глубиной очага $h < 80$ км.

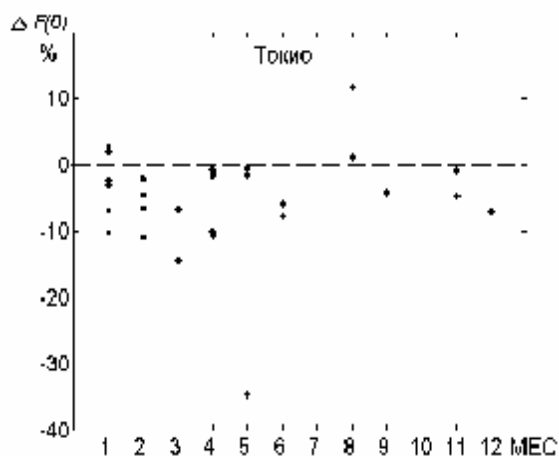


Рис.3. $\overline{\Delta F(0)}$ (в %) в день землетрясения в зависимости от месяца события.

Использованы данные станции ВЗ «Токио» (40 событий), «Акита» (53 события), «Вакканай» (48 событий) и «Ямагава» (12 событий).

Для станции Токио была исследована зависимость уменьшения $foF2$ от сезона. Число землетрясений в окрестности станции, использованных при наложении эпох, в зависимости от месяца события показано на рис.3 (ромбики). Координата ромбика по оси Y соответствует значению нормированного отклонения (в %) $\overline{\Delta F(0)}$ в день землетрясения. Из рисунка видно, что $\overline{\Delta F(0)}$ от сезона не зависит.

Обсуждение результатов и выводы

В работе исследованы ионосферные эффекты более чем для 150 сильных землетрясений с $M > 6$ в Японии. Эпицентры землетрясений в основном находились в море (см. рис. 4).

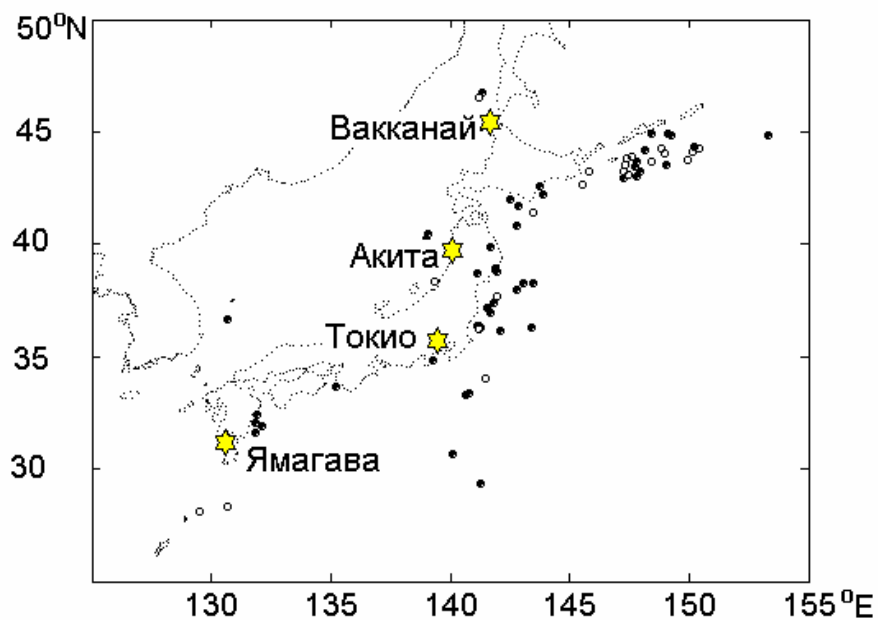


Рис.4. Карта расположения землетрясений. Черные кружки показывают эпицентры событий, для которых в (0) день $\overline{\Delta F(0)} < 0$, светлые – для которых $\overline{\Delta F(0)} > 0$.

Выяснив, что в среднем в день сильных землетрясений $foF2$ уменьшается, было интересно проанализировать вопрос: для какой доли сильных землетрясений из рассмотренной совокупности имеет место уменьшение, а для какой доли – наоборот, увеличение. Случаи отсутствия какого-либо эффекта не рассматривались. Для качественного решения этого вопроса была составлена таблица.

Показано, что за неделю до события начинается процесс уменьшения $foF2$, относительный минимум наблюдается в день землетрясения, пониженное значение сохраняется день – два после события. В среднем амплитуда понижения может достигать 5%. При анализе использовались только сутки со спокойными гелиогеомагнитными условиями – $\Sigma Kp < 30$ и индекс Вольфа $W < 100$.

Таблица.
Результаты по станциям

Станция	Уменьшение $foF2$ в(0)день	Увеличение $foF2$ в(0)день
Вакканай	30	18
Акита	37	16
Токио	31	9
Ямагава	10	2

Существуют различные взгляды на физические механизмы, которые могут объяснять наблюдаемые модификации в ходе $foF2$ до и после землетрясений. В монографиях [8, 16] обсуждались две гипотезы связи в системе «литосфера-атмосфера-ионосфера» при подготовке землетрясений. Одна из гипотез – «электромагнитная», согласно которой аномальные процессы в литосфере перед землетрясениями передаются через атмосферу в ионосферу посредством электромагнитных полей. Другая гипотеза – «акустико-гравитационная», в которой предполагается, что генерируемые в атмосфере над областью подготовки землетрясений акустико-гравитационные волны распространяются через атмосферу под очень малым углом к земной поверхности и, доходя до ионосферных высот достаточно далеко по горизонтали от эпицентров будущих землетрясений, приводят к возмущению ионосферы благодаря столкновениям ионов с нейтралами. Однако работы [2, 6, 7, 4, 10] свидетельствуют в пользу «электромагнитного» механизма.

Согласно «электромагнитному» механизму литосферно-ионосферной связи принималась гипотеза, что система «Земля-ионосфера» может быть модельно представлена сферическим конденсатором, разность потенциалов которого поддерживается грозовой активностью. Под действием электрического поля в атмосфере создается направленный к земной поверхности ток проводимости. За несколько суток до землетрясения вероятны выбросы в атмосферу радона, которые приводят к усилению процесса ионизации в атмосфере и к увеличению проводимости приземной атмосферы и вертикального тока [10]. Соответственно, ток в нижней ионосфере также возрастает, усиливается нагрев и повышается температура электронов в E -области. Далее работает механизм трансляции электрических возмущений из E -области в нижнюю часть F -области и далее выше вдоль силовых линий геомагнитного поля. В результате имеет место нагрев и диффузионное расплывание неоднородностей, и уменьшение максимума плотности слоя $F2$ за несколько дней до и после очень сильных землетрясений.

В рамках другой гипотезы, «электрогравитационной», тот же процесс нагрева и расплывания максимума может происходить за счет приходящих от Земли акустико-гравитационных волн. Авторы настоящей работы склоняются в пользу «электрического» механизма для объяснения интенсификации ионосферных эффектов, рассмотренных в этой работе. Весьма вероятно, что реально в природе работают оба механизма, их относительные роли еще мало изучены.

Список литературы

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов.С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. – М.Наука. 1992. – 304 с.
2. Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // В сб. "Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов". М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 64-87.
3. Hobaru Y. and Parrot M.: Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event, J. Atmos. Terr. Phys. 2005. V.67, 677-685.
4. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., Bogdanov V.V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes// Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V.5. N6 P. 783 – 789.

В среднем по всем станциям для всех рассмотренных землетрясений эффект имеет место в 70% случаев. Важно отметить, что эффект уменьшения $foF2$ не наблюдается для 30% очень сильных землетрясений. Чем характеризуются эти 30% землетрясений, не имеющие этого предвестника? Вопрос сложный, его решение – в будущем.

5. Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., and Chen C.S.: A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. 111, A05304, doi:10.1029/2006.
6. Ondoh T.: Seismo-ionospheric phenomena // Adv. Space Res. 2000. V. 26 (8). P.1267-1272.
7. Pulinets S.A. and Boyarchuk K.A.: Ionospheric precursors of earthquakes, Springer, Berlin, 2004.
8. Rios V.H., Kim V.P., and 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. 2004. V.33. 323-327.
9. Singh B., Kushwah V., Singh O.P., Lakshmi D.R., and Reddy B.M.: Ionospheric perturbations caused by some major earthquakes in India //Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V.29, 537-550.
10. Sorokin V.M., Chmirev V.M. Modification of the ionosphere by seismic related electric field//Atmospheric and ionospheric phenomena associated with earthquakes. Ed. M. Hayakawa / TERRAPUB, Tokyo, 1999. P. 805-818.

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ ОКОЛОПОЛУДЕННОЙ
КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ f_oE ИОНОСФЕРЫ В СВЯЗИ С
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ «ТАШКЕНТ» И
«ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ»**

**STATISTICAL ANALYSIS OF PERTURBATIONS OF IONOSPHERE MIDDLE-DAY
CRITICAL FREQUENCY f_oE IN CONNECTION WITH EARTHQUAKES ON THE
DATA OF “TASHKENT” AND “PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKIY” STATIONS**

*Е.В. Липеровская¹, В.В. Богданов², В.А. Липеровский¹,
О.А. Похотелов¹, А.С. Силина¹, А.В. Олифиров³*

¹*Институт физики земли РАН,*

²*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

³*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Ionospheric precursors of earthquakes have been investigated during the last 25 years. On the first stage the night ionosphere was analyzed, because it seems that it is difficult to separate seismoionospheric effects on the background of direct solar effects. Within the last years serious efforts were made mostly to find day-time ionosphere disturbances caused by earthquake preparation.

The analysis of such disturbances in the day-time regular E -layer, which maximal ionization density is characterized by critical frequency f_oE , is carried out in the work. It is pointed out that f_oE increased a day before an earthquake in the Middle Asia with magnitude $M > 5$. The statistical reliability of the effect is more than 99%. The dependence of the effect on magnitude, distance from the epicenter to the vertical sounding station and depth of the hypocenter is analyzed. Data of more than 300 earthquakes in the vicinity of «Tashkent» vertical sounding station and of more than 30 events in the vicinity of «Petrovavlovsk-Kamchatsky» are used in the analysis.

Введение

Критическую частоту f_oE регулярного слоя E редко анализировали с целью поиска сейсмоионосферных эффектов. Однако, в работе [4] отмечалось увеличение f_oE за сутки-двое до нескольких (порядка 20) сильных землетрясений.

Частота f_oE в первую очередь зависит от положения Солнца над горизонтом, и, конечно, от уровня солнечной активности. Эта частота также слабо зависит от возмущений геомагнитного поля, от электрических возмущений, распространяющихся сверху, из F -области, от возмущений электрической и акустической природы, распространяющихся