

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. Липеровская<sup>1</sup>, В.В. Богданов<sup>2</sup>, В.А. Липеровский<sup>1</sup>,  
О.А. Похотелов<sup>1</sup>, А.С. Силина<sup>1</sup>, А.В. Олифиров<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт физики земли РАН,*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

<sup>3</sup>*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 «Petropavlovsk-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

снизу, из нейтральной атмосферы. Прослеживается влияние метеофакторов на область  $E$  и на частоту  $foE$  [3]. Поэтому можно ожидать, что электрические и акустические и акустико-гравитационные возмущения, возникающие в нижней атмосфере в процессе подготовки землетрясений, найдут отклик в вариациях частоты  $foE$ . Однако, поскольку частота  $foE$  весьма устойчива к внешним воздействиям по сравнению с другими частотами, и её вариации от расчетной величины, вызванные возмущениями не солнечной природы, составляют порядка процента, она считалась слабо чувствительной к процессам подготовки землетрясений. Цель настоящей работы – доказать статистически наличие воздействия процессов подготовки землетрясений на вариации  $foE$  за несколько суток до землетрясений и определить, при каких условиях эффект наблюдается.

### Метод исследования

В работе были исследованы ионосферные эффекты землетрясений с магнитудами  $M > 5$ , расстояниями от станции ВЗ до эпицентров  $R < 1000$  км, и глубиной очага  $H < 70$  км в Средней Азии – станция «Ташкент» ( $\varphi = 41.3^\circ$ с.ш.,  $\lambda = 69.6^\circ$ в.д., 1964-1996 гг.), и на Камчатке – станция «Петропавловск-Камчатский» ( $\varphi = 53.0^\circ$ с.ш.,  $\lambda = 158.7^\circ$ в.д., 1968-1995 гг.) на основе представленных в Интернете <http://www.rl.ac.uk.wdcci/data.html> часовых данных.

Область  $E$  ионосферы расположена на высотах  $h = 90 \div 140$  км, плотность ионизации составляет  $N \leq 10^5$  см<sup>-3</sup> днем и на два-три порядка меньше ночью [1]. Основные ионы в  $E$ -области — это  $O_2^+$  и  $NO$ . Критическая частота  $foE$  дневного слоя  $E$  в общих чертах подчиняется теории простого слоя, развитой Чепменом ещё в 30х годах 20 века. Таким образом, в ходе  $foE$  присутствуют суточная и сезонная зависимости, а также зависимости от 11-летнего и 27-дневного солнечных циклов. Суточный ход  $foE$  по данным станции ВЗ «Ташкент» представлен на Рис. 1.

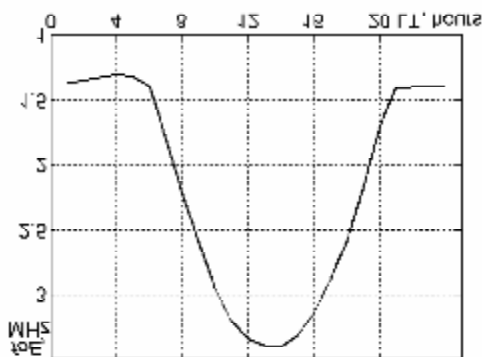


Рис.1. Суточный ход  $foE$ .

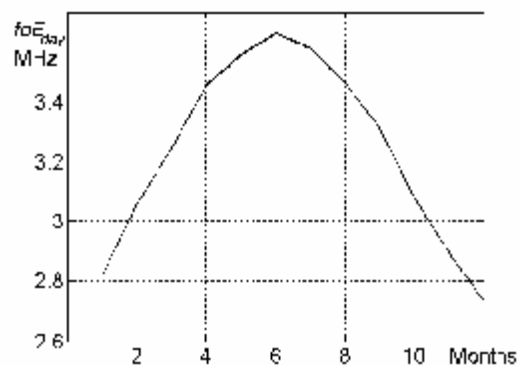


Рис.2. Сезонный ход  $foE_{\text{day}}$ .

Для исследования сейсмоионосферных эффектов в настоящей работе было выбрано дневное время с 10 до 17 ч LT, когда степень ионизации ионосферы максимальна, и зависимость от времени суток в эти часы не очень сильная по сравнению с другим временем суток. Для анализа было проведено усреднение  $foE$  по выбранному интервалу времени. Считалось, что значение  $foE_{\text{day}}$  за день определено, если из 8 возможных часовых значений имеются в наличии более половины (более 4 значений). На Рис. 2 представлен сезонный ход  $foE_{\text{day}}$ .

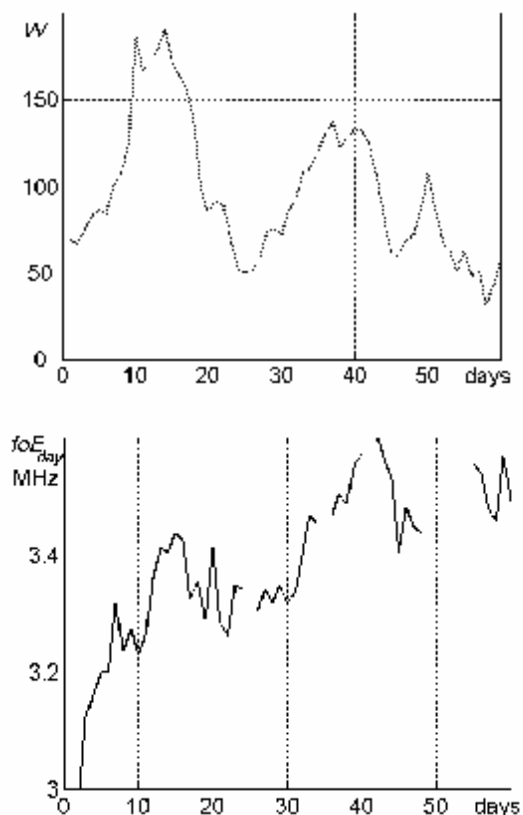


Рис. 3. Ход индекса Вольфа  $W$  (верхняя панель) и  $foE_{\text{day}}$  (нижняя панель) за один и тот же интервал времени.

среднеквадратичное отклонение. В результате получается, что каждый день анализируемого интервала характеризуется значением нормированной функции  $E(i) = \Delta E(i) / \sigma(\Delta E(i))$ .

Ионосферные эффекты землетрясений приходится искать на фоне солнечных и геомагнитных возмущений, поэтому для анализа использовались только те сутки, при которых солнечные и геомагнитные возмущения были не слишком большие. Единой точки зрения по этому вопросу нет. В данной работе исключались из рассмотрения дни с

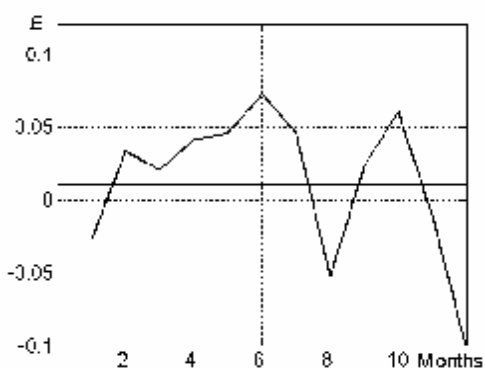


Рис.4. Сезонный ход величины  $E$ .

В ходе  $foE_{\text{day}}$  очень заметны вариации, связанные с 27-дневным солнечным циклом (Рис.3). Таким образом, выделение литосферно-ионосферных эффектов на фоне такого сезонного хода является сложной задачей. Чтобы исключить сезонную зависимость, из текущего значения  $foE_{\text{day}}$  вычитается значение этой величины, усредненное по 15 дням – (с  $-7$  по  $+7$ ) для каждого дня:  $\Delta E(i) = foE_{\text{day}}(i) - foE_{15\text{days}}(i)$ . Короткий интервал усреднения выбран для уменьшения влияния 27-дневного солнечного цикла. После получения разницы текущего и сезонного значения отбрасываем отклонения, по абсолютной величине большие 0.2 МГц. Число таких отклонений составляет порядка 1% всего массива данных (84 дня из 6425 по данным станции «Ташкент»). Большая часть больших отклонений связана с сильными геомагнитными и солнечными возмущениями, есть всплески, вызванные непонятными причинами. Мы избавляемся от них, чтобы для каждого дня точнее определить среднеквадратичное отклонение  $\Delta E(i)$  по 15 дням. Далее  $\Delta E(i)$  нормируется на её же

числами Вольфа  $W > 150$ .

Как известно, ионосферные возмущения могут продолжаться сутки после сильных геомагнитных возмущений, поэтому исключались дни, когда  $\Sigma Kp > 35$ , и следующие сутки – т.е. как положительная, так и отрицательная фазы магнитного возмущения. На рис. 4 приведен сезонный ход  $E(i)$  по данным станции «Ташкент» после отбрасывания отклонений свыше 0.2 МГц и солнечно- и магнитно возмущенных дней.

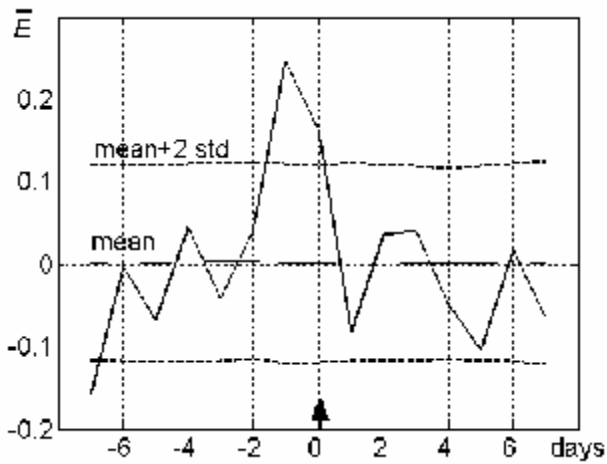


Рис.5. Результат наложения эпох для «зимних» землетрясений, 267 события.

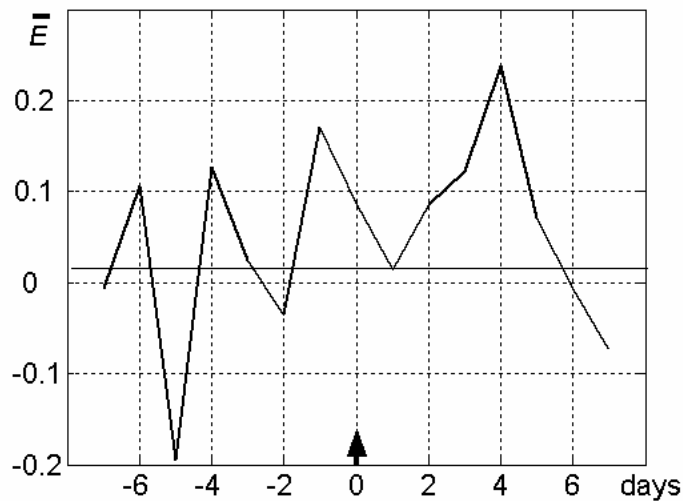
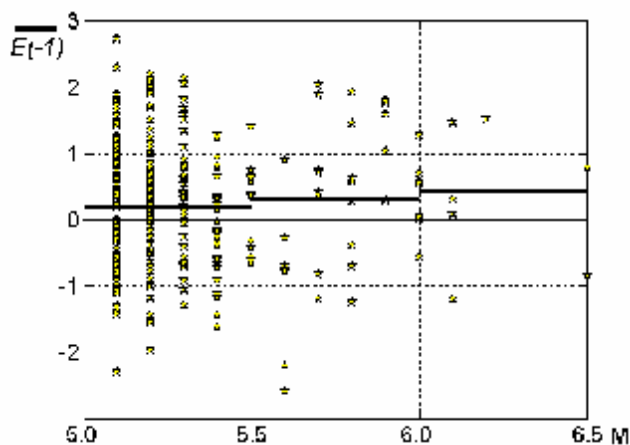
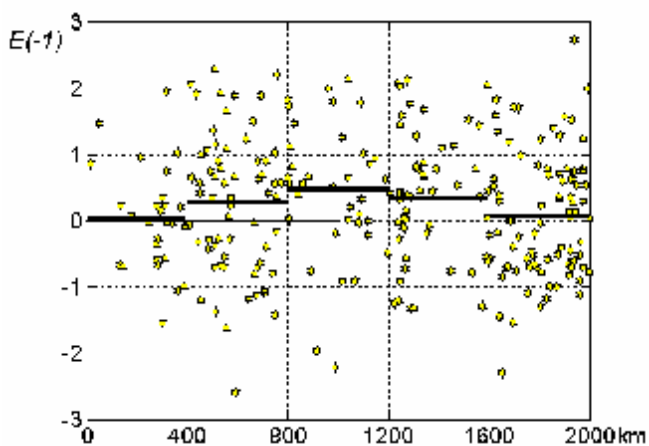
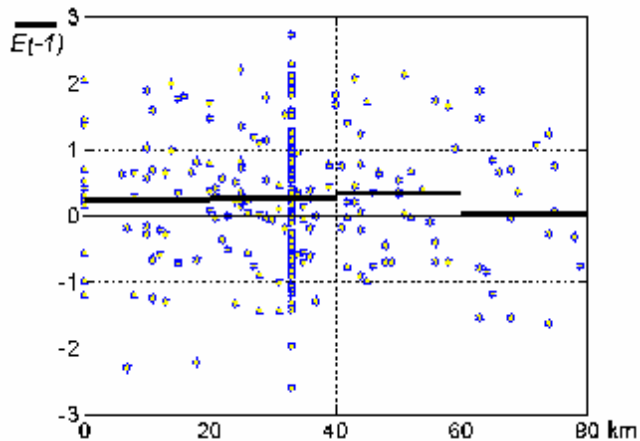


Рис.6. Результат наложения эпох для «летних» землетрясений, 80 события.

Проведем предварительную процедуру наложения эпох по интервалу времени  $(-7, \dots +7)$  суток для землетрясений с  $M > 5.0$   $h < 80$   $R < 2000$  км, используя данные станции «Ташкент», получим функцию  $\bar{E}(i)$ . Для землетрясений, произошедших зимой (с сентября по апрель) наблюдается увеличение  $\bar{E}(i)$  в  $(-1)$  и  $(0)$  дни (рис. 6, жирная линия). Отметим, что при наложении эпох в среднем для каждого дня (для  $-5$ ) или  $(+1)$  имеются данные для 267 событий. Штриховой линией показан доверительный 95% интервал, полученный с помощью метода моделирования случайного процесса (см. Липеровская и др., настоящий сборник, с...), тонкая сплошная линия – среднее значение. В  $(-1)$  день значение  $\bar{E}(-1)$  превышает указанный уровень значимости. В этот день для 154 событий наблюдается увеличение  $E$ , и для 114 – уменьшение. Для землетрясений, произошедших в летние месяцы (рис. 6), увеличения  $\bar{E}(i)$  перед землетрясениями не наблюдается. В  $(-1)$  день  $E(-1)$  больше среднего значения для 43 землетрясений, и меньше среднего значения для 37 событий.

Рис.7. Зависимость  $E(-1)$  от магнитуды  $M$ .Рис.8. Зависимость  $E(-1)$  от расстояния  $R$ .Рис.9. Зависимость  $E(-1)$  от глубины очага.

Рассмотрим зависимость  $E(i)$  в (-1) день от магнитуды (Рис.7). Жирная линия показывает среднее значение  $\bar{E}(-1)$  для землетрясений с магнитудами  $M$ , лежащими в соответствующем диапазоне. Видно, что с увеличением магнитуды наблюдается более сильное увеличение  $E(-1)$ , и, следовательно, и  $foE$  за сутки перед толчком.

Рассмотрим зависимость  $E(-1)$  от расстояния до эпицентра (Рис.8). Жирная линия показывает среднее значение  $\bar{E}(-1)$  для землетрясений с расстояниями  $R$ , лежащими в соответствующем диапазоне. Видно, что увеличение  $E(-1)$  наблюдается только для землетрясений в диапазоне расстояний  $400 < R < 1600$  км.

Рассмотрим зависимость  $E(-1)$  от глубины очага (см. рис. 9). Жирная линия показывает среднее значение  $\bar{E}(-1)$  для землетрясений с глубинами  $h$ , лежащими в соответствующем диапазоне. Видно, что увеличение  $E(-1)$  наблюдается только для землетрясений с  $h < 60$  км.

Теперь рассмотрим временную окрестность (-7...+7) суток для землетрясений в окрестности станции «Ташкент» с  $M > 5.0$ ,  $h < 60$  км,  $400 < R < 1600$  км при условиях:  $W < 150$ ,  $\Sigma Kp < 35$ . При наложении эпох получаем статистически достоверное (на 99% уровне значимости) повышение  $\bar{E}(i)$  на (-1) день (рис 10, левая панель). Штриховой линией показан доверительный 99% интервал, полученный с помощью метода моделирования случайного процесса. тонкая сплошная линия – среднее значение.

Используя данные станции «Петропавловск-Камчатский», проведем аналогичное исследование, при тех же условиях и ограничениях:  $M > 5.0$ ,  $1600 > R > 400$ ,  $h < 60$ , рассматриваются зимние месяцы, те же ограничения на вариации геомагнитного поля и солнечной активности. На рис. 10, правая панель, приведен результат наложения эпох, при наложении эпох данные имелись для 28 землетрясений. Увеличения  $\bar{E}(i)$  перед землетрясениями не наблюдается, наоборот, имеется тенденция к уменьшению перед землетрясениями. И хотя это уменьшение в (-3) день статистически достоверно на 95%

уровне значимости, было бы преждевременно делать выводы о надежном сейсмоионосферном эффекте.

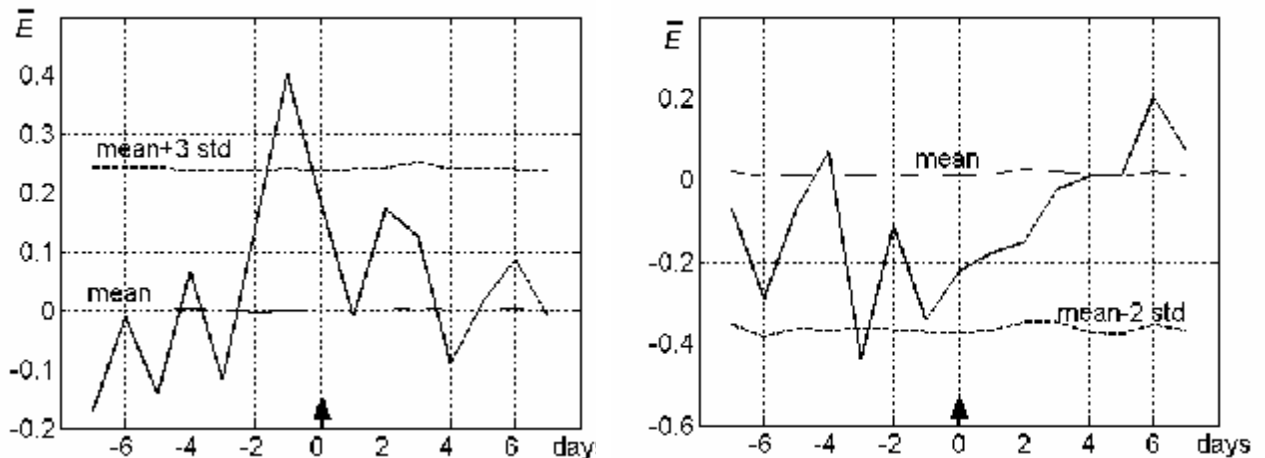


Рис.10. Результат наложения эпох для «зимних» землетрясений,  $M>5.0$ ,  $h<60$ км,  $400<R<1600$  км, станция «Ташкент», 144 события, (справа), станция «Петропавловск-Камчатский», 28 событий, (слева).

### Обсуждение результатов и выводы.

Итак, получено, что по данным станции «Ташкент» «зимние» землетрясения дают увеличение  $foE$  за день до события, для «летних» землетрясений увеличение не наблюдается. Эффект имеет место для землетрясений с магнитудами  $M>5$  и глубиной очага  $h<60$  км, на расстояниях  $400<R<1600$  км от эпицентра до станции ВЗ. Статистическая достоверность повышения превышает 99%. Для землетрясений в окрестности станции «Петропавловск-Камчатский» увеличения  $foE$  не наблюдается, наоборот, есть тенденция к уменьшению  $foE$  за 3-4 суток перед землетрясениями.

Обнаруженные закономерности позволяют сделать вывод, что в ионосфере над станцией «Ташкент» увеличение  $foE$  происходит за счет акустико-гравитационных волн (АГВ). Эти волны достигают  $E$ -области ионосферы на больших расстояниях от эпицентра (400-1600 км [2]), при диссипации АГВ в  $E$ -области происходит нагрев, а при повышении температуры коэффициент рекомбинации, который в  $E$ -области зависит от температуры пропорционально  $T^\beta$ , где  $\beta<1$  [5], уменьшается, и, следовательно, плотность ионизации увеличивается. АГВ могут пройти через стратосферу только при западных стратосферных ветрах, а именно такие ветры преобладают в зимние месяцы [3]. Землетрясения происходят в окрестности Ташкента – и, по-видимому, над пустыней и горами АГВ могут генерироваться. Области подготовки землетрясений в окрестности «Петропавловска-Камчатского» находятся в море, и механизм сейсмоионосферной связи над Камчаткой, по-видимому, с генерацией АГВ не связан.

### Список литературы

1. Антонова Л. А., Иванов-Холодный Г. С., Чертопруд В. Е. Аэрономия слоя E. – М.: Янус, 1996. – 168 с.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. – 527 с
3. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вегасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат. 1987. –271 с.
4. Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Дистанционный отклик слоя E ионосферы на сильные землетрясения// В сб. "Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно–космических методов". М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 152-155.
5. Николе М. Аэрономия. – М.: Мир, 1964. – 278 с.