

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ $foF2$ ИОНОСФЕРЫ ЗА НЕСКОЛЬКО СУТОК ДО И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ «ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ» И «ТОКИО»

STATISTICAL ANALYSIS OF IONOSPHERIC CRITICAL FREQUENCY $foF2$ DISTURBANCES A FEW DAYS BEFORE AND AFTER EARTHQUAKES ON THE DATA OF “PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKIY” AND “TOKYO” STATIONS

*Е.В. Липеровская¹, В.В. Богданов², М.В. Родкин³, К.-В. Мейстер⁴,
А.С. Силина¹, О.В. Мандрикова²*

¹*Институт физики земли РАН,*

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

³*Геофизический Центр РАН,*

⁴*Астрофизический институт, Потсдам, Германия*

The statistical analysis of critical frequency $foF2$ averaged over middle-day hours – from 11 till 17 h LT – is carried out. Disturbances of $foF2$ in connection to earthquakes are distinguished on the background of seasonal, geomagnetic, 11-years and 27-days Solar variations. The normalized values F , obtained by subtracting season run, obtained as mean value on (-7...+7) days interval, from $foF2$ and dividing the result on its standard deviation are used in analysis. Days with high Solar (Wolf number >100) and geomagnetic ($\Sigma Kp > 30$) disturbances are excluded from the analysis. Events with magnitude $M > 5$, distance from the station $R < 500$ km and depth $h < 70$ km are analyzed. The superimposed method is used to the F time dependence, and it is obtained that F increases 3÷5 days before earthquakes and then decreases a day – two before the shock. The decreased values of F remained two-tree days after earthquakes with $M > 5.5$. The effect depends on magnitude of an earthquake. For the events with $M > 5.5$ the reliability of the effect is more than 95%. Data of more than 80 earthquakes in the vicinity of Petropavlovsk-Kamchatsky and of more than 200 earthquakes in the vicinity of Tokyo are used in the analysis and analogous results are obtained.

Введение

В начале 1980-х годов по результатам анализа наблюдений ионосферы на станциях вертикального зондирования в сейсмоактивных районах Средней Азии было высказано предположение, что критическая частота $foF2$, соответствующая плазменной частоте в максимуме слоя F , может оказаться достаточно чувствительной к процессу подготовки землетрясений [5, 2, 3, 4, 11, 9]. Эта идея требовала проверки и практического применения, учитывая наличие большого количества непрерывно действующих станций вертикального зондирования ионосферы, расположенных в различных точках нашей планеты, в том числе и в сейсмоактивных регионах.

Анализ результатов исследования поведения $foF2$ в ночных условиях по нескольким станциям для ряда землетрясений порядка десятка с $M > 4.5$ [9, 8] привел к выводу о наличии эффекта повышения среднего ночного уровня $foF2$ перед землетрясениями за несколько дней до события. В большинстве случаев в периоды подготовки землетрясений за 2-3 сут до момента толчка в широкой области ионосферы $\pm 10^\circ$ по широте и $\pm 100^\circ$ по долготе в ночных условиях в магнитоспокойное и умеренно возмущенное время происходит среднее увеличение $foF2$. С другой стороны, отмечается относительный минимум $foF2$ над эпицентральной областью за одни сутки до события. Заметим, что в цитированных работах речь шла о землетрясениях в Средней Азии. Далее, увеличение $foF2$ перед несколькими очень сильными землетрясениями было отмечено в работах [16, 1, 7]. Однако в ряде случаев предвестниковый эффект не наблюдался.

С другой стороны, в работах [12, 15, 18, 19] отмечалось уменьшение критической частоты $foF2$ перед несколькими очень сильными землетрясениями ($M > 6$). Статистические исследования уменьшения $foF2$ в послеполуденные часы перед землетрясениями с $M > 5$ на Тайване были проведены в работе [13]. В этой работе было показано, что уменьшение

происходит в интервале 12.00-18.00 LT за 0-5 дней перед землетрясениями и может иногда достигать 25%.

Цель настоящей работы – провести статистический анализ эффекта увеличения или уменьшения $foF2$ за 3-5 суток до землетрясений, определить, при каких магнитудах и расстояниях до эпицентра эффект имеет место.

Метод исследования

В настоящей работе были исследованы ионосферные эффекты сильных землетрясений с магнитудами $M > 5$, расстояниями от станции ВЗ до эпицентров $R < 500$ км, и глубиной очага $h < 70$ км в Японии – станция «Кокубунжи» (Токио) ($\varphi = 35.7^\circ$ с.ш., $\lambda = 139.5^\circ$ в.д., 1957-1990 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> данных.

Дневная F -область ионосферы формируется при воздействии солнечного излучения на нейтральную атмосферу в интервале длин волн 14–80 нм и связана, в основном, с ионизацией компонент атмосферы O и N_2 . Высота и плотность главного максимума зависят от конкуренции процессов ионизации за счет солнечного излучения и рекомбинации. Для исследования сейсмоионосферных эффектов в настоящей работе было выбрано дневное время с 11 до 16 ч LT, когда степень ионизации ионосферы максимальна, с одной стороны, а с другой стороны, сильно ионизованные области расположены ближе к земной поверхности, чем в другое время суток. Усредненная за указанное выше дневное время частота $foF2_{day}$ сложно зависит от сезона, имеет два максимума – весной и осенью, и два минимума – зимой и летом. Сезонный ход $foF2_{day}$ по данным станции «Токио» за 1957-1990 гг. представлен на рис. 1.

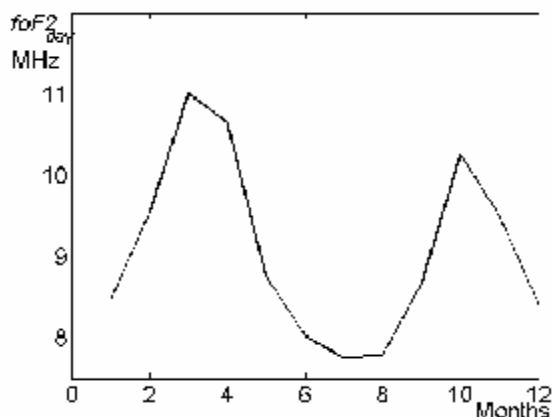


Рис. 1. Сезонный ход $foF2_{day}$.

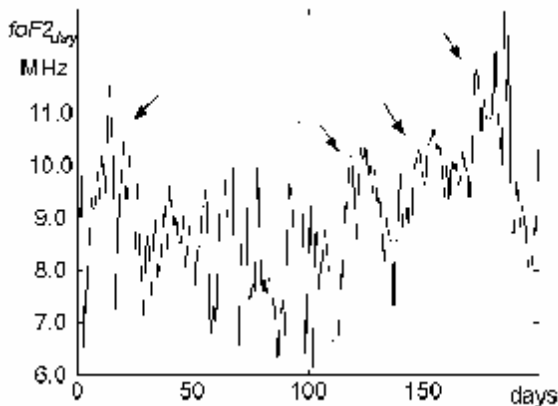


Рис. 2. Фрагмент хода $foF2_{day}$, стрелки указывают всплески, вызванные 27-дневными солнечными вариациями.

Кроме того, в ходе $foF2_{day}$ просматриваются вариации, связанные с 27-дневным солнечным циклом (Рис. 2). Таким образом, выделение литосферно-ионосферных эффектов на фоне такого сезонного хода является сложной задачей.

Чтобы исключить сезонную зависимость, из текущего значения $foF2_{day}$ вычитается усредненное по 15 дням – (с -7 по $+7$) для каждого дня значение этой величины:

$\Delta f(i) = foF2_{day}(i) - foF2_{15days}(i)$. Отметим, что короткий интервал усреднения выбран для уменьшения влияния 27-дневного солнечного цикла. После получения разницы текущего и сезонного значения отбрасываем отклонения, по абсолютной величине большие 2 МГц. Число таких отклонений составляет порядка 1% всего массива данных. Их большая часть связана с сильными геомагнитными и солнечными возмущениями, есть всплески, вызванные непонятными причинами. Мы избавляемся от них, чтобы для каждого дня точнее определить среднее квадратичное отклонение $\Delta f(i)$ по 15 дням. Далее $\Delta f(i)$ нормируется на её же среднее квадратичное отклонение. В результате получается, что каждый день анализируемого интервала характеризуется

значением нормированной функции $F(i) = \Delta f(i) / \sigma(\Delta f(i))$.

Ионосферные эффекты землетрясений приходится искать на фоне солнечных и геомагнитных возмущений, поэтому при исследовании эффектов землетрясений рассматривались 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 числами Вольфа $W > 100$. Как известно, ионосферные возмущения могут продолжаться сутки после сильных геомагнитных возмущений, поэтому исключались дни, когда $\Sigma Kp > 30$, и следующие сутки.

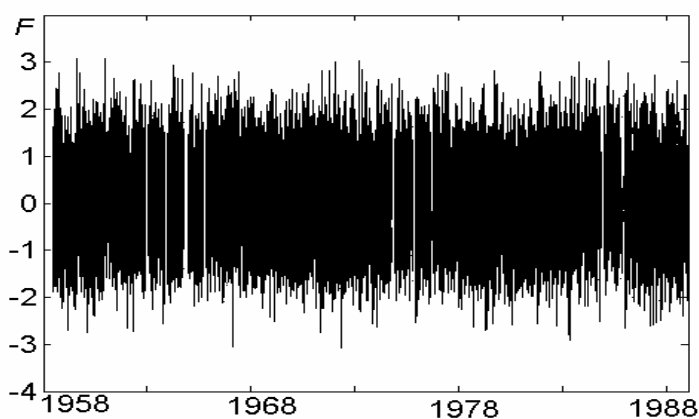


Рис.3. Ход нормированной величины F («Токио»).

На рис 3. приведен ход нормированной величины F , вычисленный по данным станции «Токио» за 32 года.

Перейдя от исследования $foF2$ к исследованию F всё же полностью избавиться от сезонного хода не удалось, однако теперь сезонный ход вносит слабый вклад в ход F .

На рис. 4 и рис.5 приведены сезонный ход функции F для «Токио» и «Петропавловска-Камчатского». Прямая штриховая линия показывает среднегодовые значения

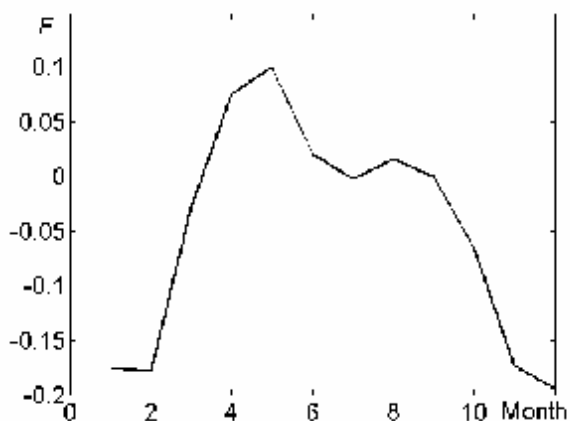


Рис.4. Сезонный ход F по данным станции «Токио».

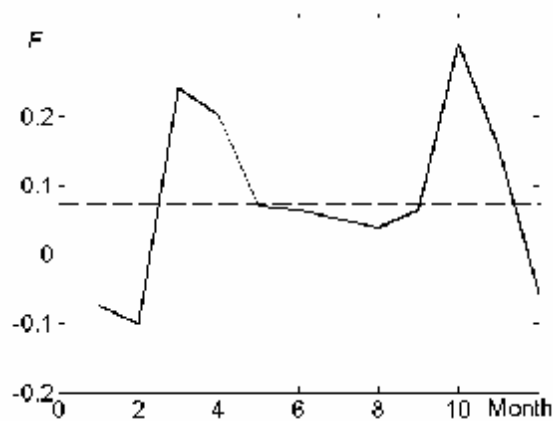


Рис.5. Сезонный ход F по данным станции «Петропавловск-Камчатский».

Максимальное значение величины сезонного хода составляет 0.15 для «Токио», и 0.30 для Петропавловска. Заметим, что для «Петропавловска» очень велика амплитуда сезонного хода F для марта и октября, (см. Рис. 5) В данной работе нас интересуют основные закономерности эффектов, связанных с сейсмической активностью, поэтому исключаем из анализа данные F за март и октябрь по станции «Петропавловск-Камчатский».

При анализе сначала рассматриваем землетрясения с магнитудами $M > 5.5$, расстояниями от эпицентра до станции $R < 500$ км и глубинами очага $h < 70$ км.

Проведем процедуру наложения эпох для F по интервалу времени $(-15, \dots, +15)$ суток по данным каждой станции, и для каждой станции ВЗ получаем функцию \bar{F} .

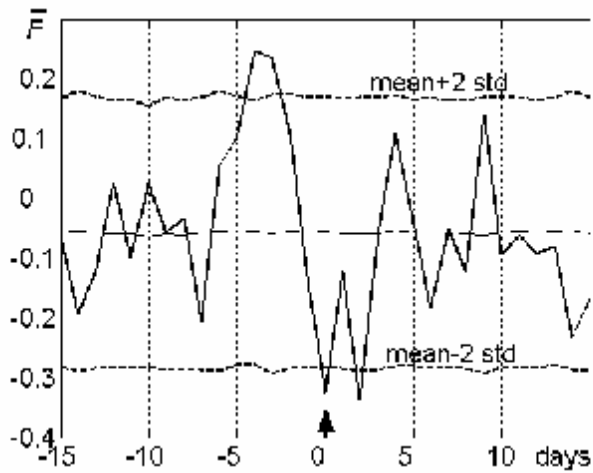


Рис.6. Результат наложения эпох по данным станции «Токио», 67 землетрясений, $M > 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

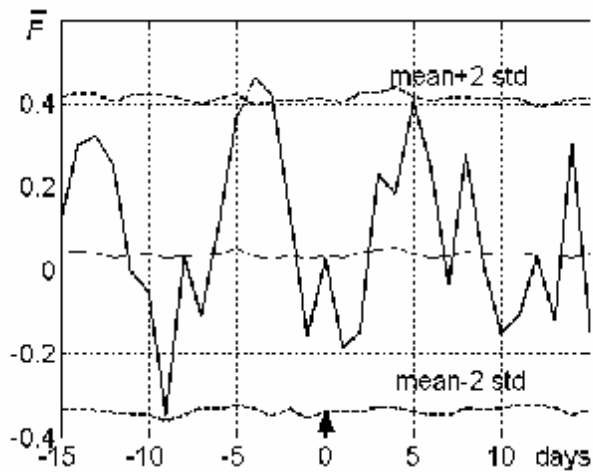


Рис.7. Результат наложения эпох по данным станции «Петропавловск-Камчатский», 24 землетрясения, $M > 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

землетрясений. Проводим процедуру наложения эпох для виртуальных землетрясений точно так же как для реальных землетрясений. Таких серий может быть несколько тысяч. Поскольку данные с пропусками, оставляем для анализа только те результаты процедуры наложения эпох, для которых число дней с имеющимися в наличии данными отличается от реального числа дней не более чем на 20% (например, для «Токио» число дней может составлять 67 ± 13 , для «Петропавловска-Камчатского» – 24 ± 5). Таких оставленных для анализа серий должно быть несколько сотен. Для каждого дня от (-15) до (+15) полученные по нескольким сотням серий результаты наложения эпох распределены в соответствии с нормальным законом. Для таких серий для каждого дня от (-15) до (+15) подсчитываем среднее и среднеквадратичное отклонение. Число серий должно быть так велико, чтобы среднее и среднеквадратичное не менялось при увеличении числа серий. Среднее значение на рисунках представлено тонкой сплошной линией, среднее + 2 среднеквадратичных, что означает 95% уровень значимости, представлено штриховой линией.

Для дальнейшего исследования сильных с $M > 5.5$, но более далеких землетрясений с $500 < R < 1000$ км интервалы (-7,+7) дней во временной окрестности событий с $M > 5.5$ и $R < 500$ км исключены, чтобы исключить влияние процессов подготовки более сильных землетрясений. Для землетрясений $500 < R < 1000$ км в окрестности Токио небольшое

Для землетрясений в окрестности «Токио» (Рис.6) наблюдается увеличение \bar{F} (жирная линия) на (-6) – (-2) дни, причем в дни (-4, -3) величина \bar{F} превышает 95% доверительный интервал (штриховая линия). Сплошная тонкая линия – среднее значение \bar{F} . Для событий в окрестности «Токио» уменьшение \bar{F} после землетрясений тоже значимо. При наложении эпох данные для каждого дня имелись в среднем для 67 событий.

Для землетрясений в окрестности «Петропавловска-Камчатского» (Рис.7) наблюдается увеличение \bar{F} для на (-5) – (-3) дней. При этом в дни (-4, -3) \bar{F} превышает 95% доверительный интервал. При наложении эпох данные для каждого дня имелись в среднем для 24 событий.

Доверительный интервал вычисляется методом моделирования фонового распределения с помощью случайного процесса. Предполагаем, что землетрясения распределены равномерно по интервалу наблюдения. С помощью генератора случайных чисел выбираем дни виртуальных событий, их число равно числу реальных

увеличение \bar{F} перед землетрясениями наблюдается, но оно незначимо статистически. В окрестности «Петропавловска-Камчатского» число таких землетрясений порядка 10, что недостаточно для анализа.

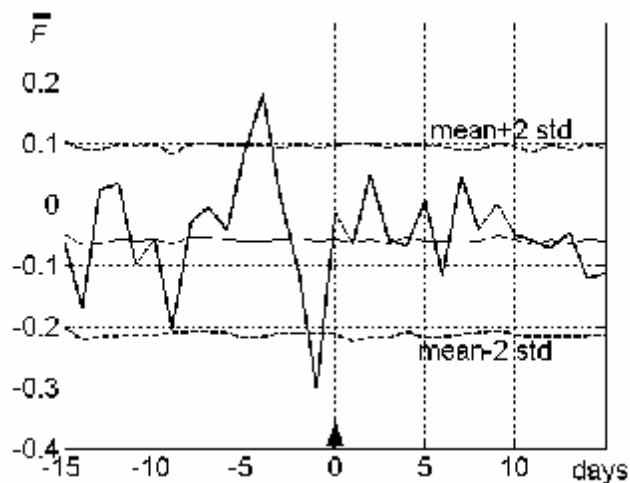


Рис. 8. Результат наложения эпох по данным станции «Токио», 129 землетрясений, $5.0 < M \leq 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

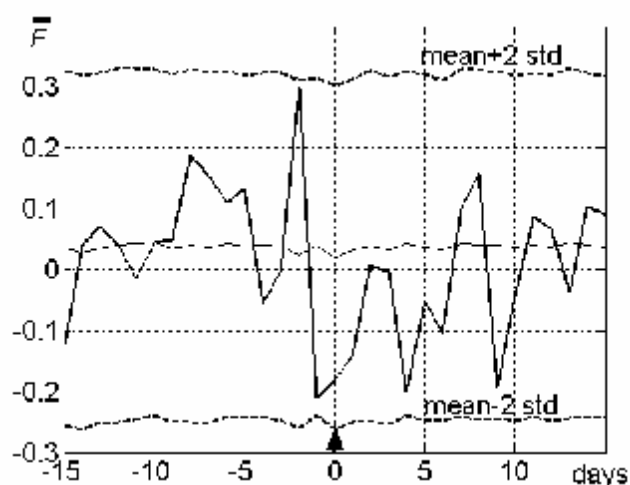


Рис.9. Результат наложения эпох по данным станции «Петропавловск-Камчатский», 44 землетрясения, $5.0 < M \leq 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

Обсуждение результатов и выводы

Итак, получено, что за 3-6 суток до землетрясений с $M > 5.5$ в среднем наблюдается заметное увеличение $foF2$, а затем имеется тенденция к уменьшению этого параметра к моменту землетрясения. Для землетрясений с магнитудами $5.0 < M \leq 5.5$ также наблюдается сначала увеличение $foF2$, а затем уменьшение к моменту землетрясения, но характерные времена увеличения $foF2$ меньше. Эти результаты требуют усложненную интерпретацию эффектов.

В настоящее время имеются две основных гипотезы связи в системе «литосфера-атмосфера-ионосфера», изложенные в монографиях [8, 16], на основе которых можно объяснять наблюдаемые модификации в ходе $foF2$ до и после землетрясений.

Одна из гипотез – «акустико-гравитационная», в соответствии с которой в атмосфере над областью подготовки землетрясений генерируются акустико-гравитационные волны, которые далее распространяются через атмосферу вверх под

Чтобы выделить чистый эффект для более слабых землетрясений, интервалы $(-7, +7)$ дней во временной окрестности сильных событий с $M > 5.5$ $R < 1000$ км исключены из рассмотрения.

Теперь перейдем к исследованию эффектов более слабых землетрясений: $5.0 < M \leq 5.5$ при $R < 500$ км. Оказалось, что времена наблюдения максимального увеличения \bar{F} различаются для «Токио» и «Петропавловска-Камчатского» (рис. 8, 9).

Для землетрясений $5.0 < M \leq 5.5$ в окрестности «Токио» наблюдается значимый эффект увеличения \bar{F} за 5 дней до землетрясения.

Для таких землетрясений в окрестности «Петропавловска-Камчатского» увеличение \bar{F} наблюдается на (-2) день, но оно незначимое. Однако следует отметить, что число таких землетрясений в окрестности «Петропавловска» невелико.

Уменьшение \bar{F} после события статистически незначимо на 95% уровне значимости.

Таким образом, показано, что наблюдается увеличение $foF2$ за 3-5 сут до землетрясений с $M > 5.0$. Для землетрясений с $M > 5.5$ также просматривается уменьшение за день-два до события.

малым углом к земной поверхности. Эти волны доходят до ионосферных высот достаточно далеко по горизонтали от эпицентров будущих землетрясений и приводят к возмущению ионосферы благодаря столкновениям ионов с нейтралами [14]. В результате происходит процесс нагрева ионосферной плазмы, расплывания неоднородностей и уменьшение максимума плотности слоя $F2$. Интерпретация на основе акустико-гравитационной гипотезы вряд ли может быть использована, так как рассматриваемый эффект наблюдается на расстояниях до 500 км.

Другая гипотеза – «электромагнитная», согласно которой система «Земля-ионосфера» может быть модельно представлена сферическим конденсатором, разность потенциалов которого поддерживается грозовой активностью. За несколько суток до землетрясений вероятны пульсации выбросов радона в атмосферу, приводящие к нестационарным процессам ионизации и к увеличению проводимости и вертикального тока в атмосфере [10, 20, 17]. Соответственно, вертикальный ток в нижней ионосфере также возрастает, и повышается температура электронов в E -области. Повышение температуры далее приводит к уменьшению коэффициента рекомбинации, который в E -области зависит от температуры пропорционально T^β , где $\beta < 1$ и, соответственно, увеличению концентрации заряженных частиц. Таким образом, происходит увеличение плотности заряженных частиц в E -области. При трансляции возмущений плотности из E -области в нижнюю часть F -области и далее вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля происходит нагрев, усиление диффузионного расплывания неоднородностей, и, соответственно, уменьшение максимума плотности слоя $F2$ за сутки-двое до и после сильных землетрясений.

Для интерпретации эффекта увеличения $foF2$ за 3-5 дней перед землетрясениями обратим внимание на другой возможный конкурирующий процесс. Можно предположить, что в F -области за 3-5 дней, по-видимому, преобладает нестационарный процесс подъема вверх нейтральной компоненты а) за счет отдельных акустических импульсов, идущих снизу, б) за счет возмущений электрического поля и проводимости в атмосфере. Это ведет к эпизодам подъема плазмы вверх, к уменьшению рекомбинации и, соответственно, увеличению $foF2$, т.е. плотности плазмы в максимуме слоя. При этом нагрев, диффузия и расплывание максимума слоя $F2$ менее существенны. Далее, за два-три дня до момента землетрясения и после него, наоборот, преобладает процесс нагрева электронов плазмы F -области, усиливаются рекомбинация и диффузия, ведущие к расплыванию максимума и уменьшению $foF2$.

Заметим, что предложенная гипотеза снимает противоречия между работами, утверждавшими, что главный эффект – это увеличение $foF2$ перед землетрясениями, и работами, утверждавшими, что главный эффект – это уменьшение. В различных случаях преобладают разные процессы и разные члены в уравнении для плотности плазмы [6]. В каждой конкретной ситуации результирующий эффект определяется не только передаваемой энергией, ведущей к нагреву, но и ориентацией и величиной среднего электрического поля, скоростью нагрева плазмы и ее конвекции из области повышенного давления, системой ветров и близостью зондируемой области к источнику возмущения.

Список литературы

1. Гайворонская Т.В. Ионосферные вариации в сейсмоактивных районах // Физика Земли. 2005. № 3. С.56-60.
2. Гохберг М.Б., Гершензон Н.И., Гуфельд И.Л., Кустов А.В., Липеровский В.А., Хусамидинов С.С. О возможных эффектах воздействия электрических полей сейсмического происхождения на ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24. № 2. С. 217–222.
3. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А. Электромагнитные предвестники в системе прогноза землетрясений: поиски, проблемы // Вестник АН СССР. 1987. № 3. С. 43–54.
4. Гохберг М.Б., Кустов А.В., Липеровская Р.Х., Липеровский В.А., Харин Е.П., Шалимов С.Л. О возмущениях в F -области ионосферы перед сильными землетрясениями //

- Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 4. С. 12–20.
5. Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 10. С. 17–21.
 6. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). Л.: Гидрометеоздат, 1990. 190 с.
 7. Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмо-ионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45, №5. С.665-671.
 8. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
 9. Липеровский В.А., Алимов О.А., Шалимов С.Л., Гохберг М.Б., Липеровская Р.Х., Саидшоев А. Исследование F-области ионосферы перед землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 12. С. 77–86.
 10. Сорокин В. М., Чмырев В. М. Физико - химическое воздействие очага землетрясения на околоземное космическое пространство // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 6. С. 136–144.
 11. Хакимов Ф.Х., Липеровский В.А., Шалимов С.Л., Алимов О.А., Липеровская Р.Х., Рубцов Л.Н. О возмущениях в ионосфере перед рядом землетрясений в Таджикистане 1987 г. // Докл. АН Тадж. ССР. 1989. Т. 32. № 12. С. 824–828.
 12. Nobara Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event // J. Atmos. Terr. Phys. 2005. V. 67. P.677-685.
 13. Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. 111, A05304, doi:10.1029/2006.
 14. Miyaku K., Hayakawa M., Molchanov O.A. The role of gravity waves in the lithosphere-ionosphere coupling as revealed from the subionospheric LF propagation data // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. M. Hayakawa, O.A. Molchanov. Tokyo: TERRAPUB, 2002. P.229-233.
 15. Ondoh T. Seismo-ionospheric phenomena // Adv. Space Res. 2000. V.26, N8. P.1267-1272.
 16. Pulnits S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 2004. 215 p.
 17. Pulnits S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling // Adv. Space Res. 2000. V.26, N 8. P.1209-1218.
 18. 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. 2004. V.33. P. 323-327.
 19. Singh B., Kushwah V., Singh O.P., Lakshmi D.R., Reddy B.M. Ionospheric perturbations caused by some major earthquakes in India // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V.29. P.537-550.
 20. Sorokin V.M., Yashenko A.K., Hayakawa M. Formation mechanism of lower-ionospheric disturbances by the atmosphere electric current over a seismic region // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2006. V.68. P.1260-1268