

Статистика и моделирование сейсмоионосферных эффектов в F -области по данным станции вертикального зондирования Токио

Е.В. Липеровская¹, М.В. Родкин^{1,2,3}

¹ *ИФЗ РАН,*

² *ИТПЗ РАН*

³ *ИМГиГ ДВО РАН*

В работе при поиске сейсмоионосферных эффектов в F области рассмотрены вариации критической частоты $foF2 \sim \sqrt{N_{max}}$, где N_{max} – максимальная плотность ионизации области F . Эта частота регистрируется станциями наземного вертикального зондирования (ВЗ).

По литературным данным в вариациях $foF2$ сейсмоионосферные эффекты наблюдаются для EQ с $M6+$, как правило в промежуток времени не более 5 дней до и 5 дней после EQ. За сейсмоионосферные эффекты, как правило, принимали положительные и отрицательные всплески, превышающие некий порог: порог разные авторы выбирали различный, привязанный к среднеквадратичному отклонению от медианы – 1, 1.5, 2 среднеквадратичных отклонения; фоновое среднеквадратичное отклонение составляет около 10% $foF2$; средняя амплитуда эффекта составляла несколько процентов. Глубины EQ, для которых эффекты наблюдаются, обычно до 60 км. Эффекты анализировали на расстояниях R до несколько сотен км от эпицентра EQ или в пределах радиуса Добровольского $R=10^{0.43M}$ [Dobrovolsky et al., 1979].

Аномалии встречались разного знака, причем отмечалось изменение знака аномалий в течение интервала времени существования сейсмоионосферных эффектов.

Задача работы: статистически исследовать достоверность сейсмоионосферных эффектов в вариациях критической частоты foF2 в зависимости от расстояния от эпицентра и глубины очага, на расстояниях до 2000 км от эпицентра.

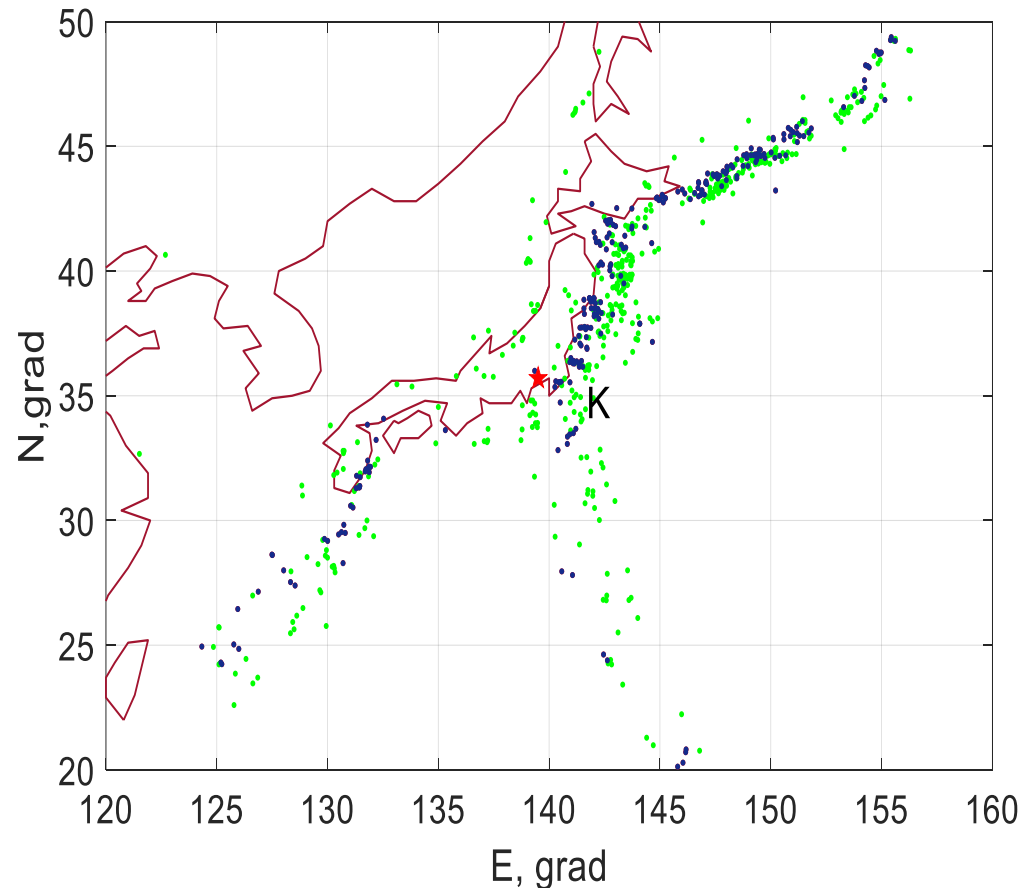


Рис. 1 Карта расположения землетрясений $M6+$, $H < 35$ км-зеленый, $35 \leq H < 70$ км- темно-синий, $R < 2000$ км, указана станция ВЗ К-Кокубунji (Токио). Каталоги ISC-GEM 1957-1976, и GCMT 1977-2020 гг.

В [Rodkin, 2022] по мировым сейсмологическим данным было показано, что механизмы реализации землетрясений с глубинами примерно до 30 км и глубинами 30-70 км различаются, а в [Родкин, Липеровская, 2023] на основе данных вертикального зондирования по станции Токио продемонстрировано различие сейсмоионосферного отклика на процессы подготовки землетрясений с глубинами в диапазонах 0-35 км и 35-70 км . Такое различие может отвечать разным механизмам сейсмоионосферных связей – благодаря выделению радона, изменениям электропроводности литосферы, развитию тепловых аномалий и акустико-гравитационных волн.

Будем отдельно исследовать сейсмоионосферные эффекты от землетрясений с различными глубинами и покажем, что статистически для землетрясений с глубинами в диапазонах 0-35 км и 35-70 км сейсмоионосферные эффекты проявляются на различных расстояниях.

Используем стандартный прием: для каждого часа рассматривались отклонения $foF2$ от скользящей медианы, нормированные на эту же медиану $\Delta f_i = (foF2_i - median(foF2)) / median foF2$, где $median(foF2)$ медиана за (-7, +7) дней вокруг i -го часа, который полагался нулевым.

Сутки с $\Sigma Kp > 25$ и последующие сутки исключались.

Применим метод наложения эпох для Δf к Eqs на интервалах (-240, +240) час, на расстояниях $R < 2000$ км.

Землетрясения с глубинами $35 \leq H < 70$ км

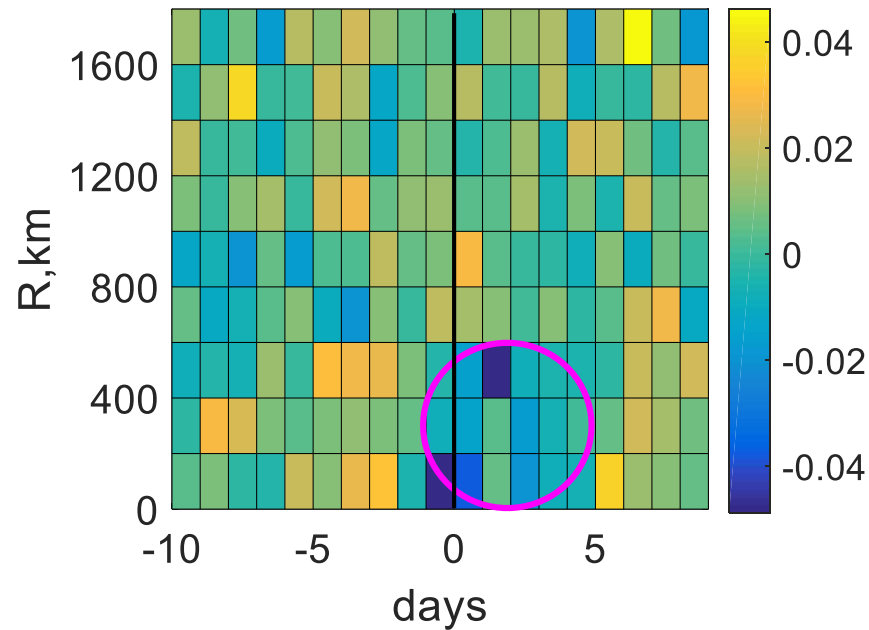


Рис. 2_1. Результат наложения эпох за интервал 1957-2020 гг. Отклонения от фонового значения частот f_oF2 в окрестности землетрясений $35 \leq H < 70$ км, $M6.0+$.

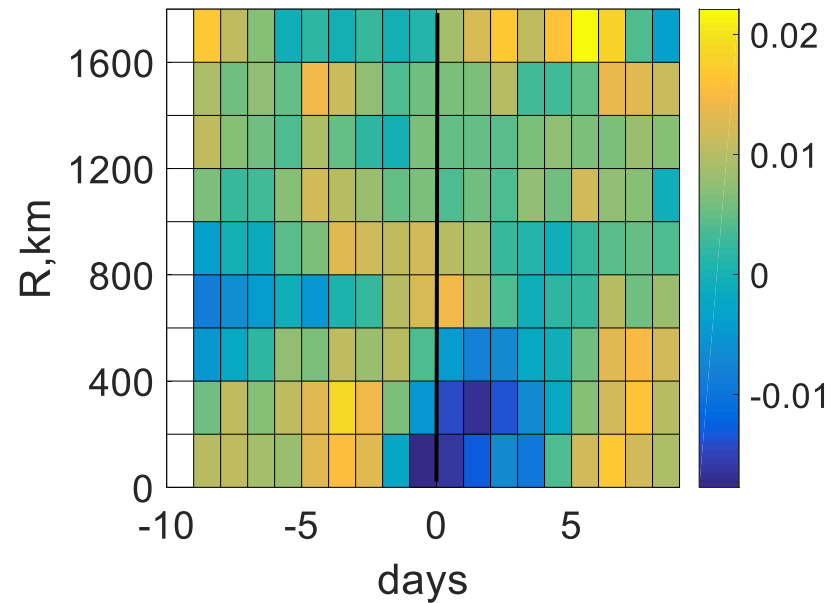


Рис. 2_2 Аномалия сглажена по ячейкам: (-1, +1) по горизонтали и (0,+1) по вертикали – получается по 6 ячейкам.

Наиболее выражена аномалия в (-1) сутки и видна на расстояниях до 600 км.

Всего в области 77 Eqs, данные есть для 47 Eqs, из них в (-1) сутки Δf меньше фонового уровня для 31 Eqs, и больше для 16 Eqs, в целом наблюдается уменьшение f_oF2 . Случайность такого перекоса менее 1.5%

Землетрясения с глубинами $H < 35$ км

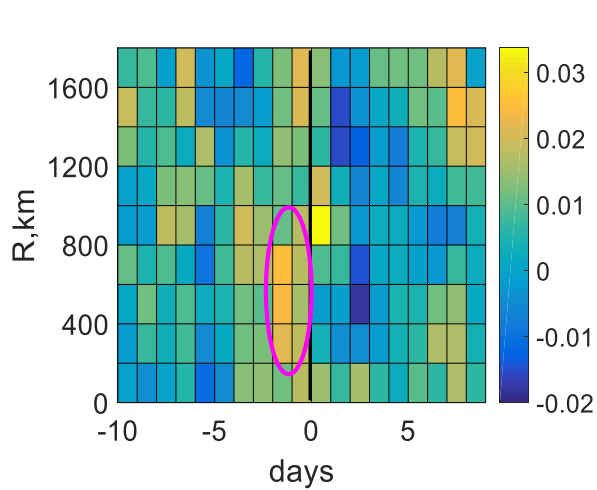


Рис. 3_1. Результат наложения эпох за интервал 1957-2020 гг. Отклонения от фонового значения частот $foF2$ в окрестности Eqs $H < 35$ км, $M 6.0+$.

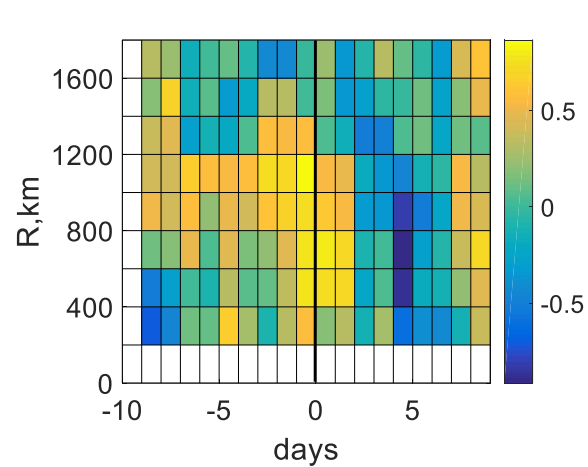


Рис 3_2. Значения коэффициентов корреляции для величин отклонений от фонового значения частот $foF2$ в окрестности Eqs $H < 35$ км, $M 6.0+$ для двух непересекающихся интервалов времени 1957-1988 и 1989-2020 г.

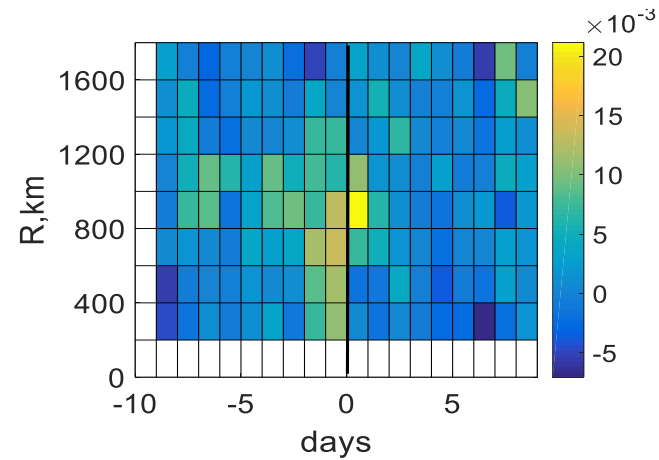


Рис. 4_1. Устойчивая аномалия величин отклонений от фонового значения частот $foF2$ в окрестности Eqs $H < 35$ км, $M 6.0+$ для двух непересекающихся интервалов времени 1957-2020 г.

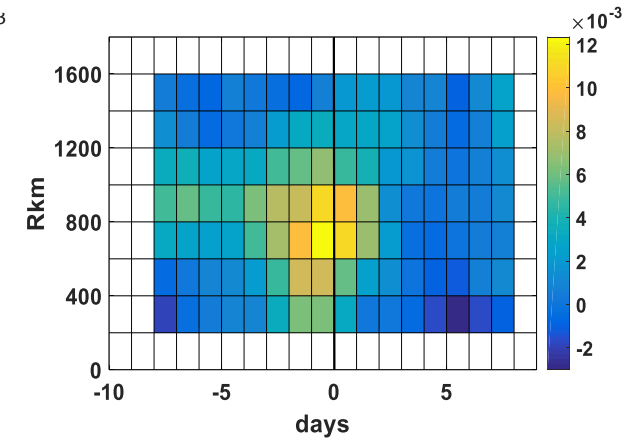


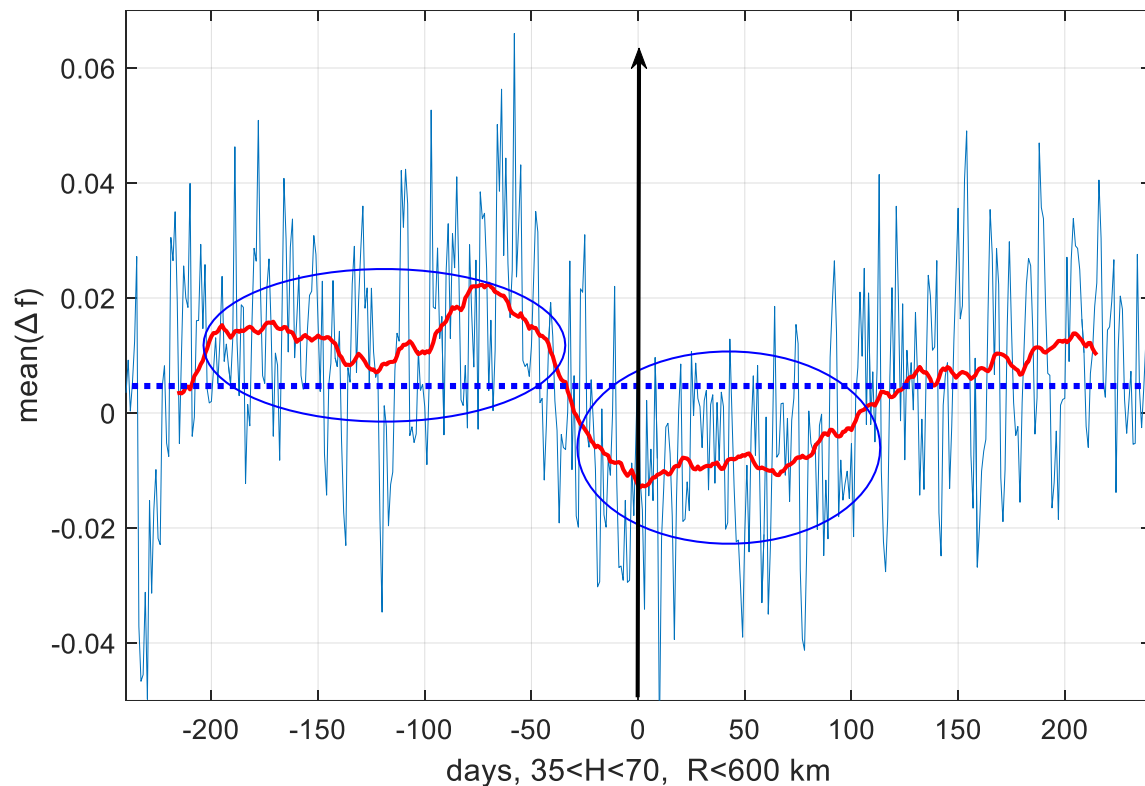
Рис. 4_2. Аномалия Рис. 4_1, сглаженная по 6 ячейкам.

Амплитуда увеличения f_oF2 максимальна на (-4, ...-1) сутки на расстояниях $600 < R < 1000$ км. За 1957-2020 гг., произошло 67 Eqs с глубиной до 35 км на таких расстояниях. Данные имеются для 36 Eqs, для 25 Eqs наблюдается увеличение f_oF2 -, для 11 Eqs - уменьшение. **Случайность такого отклонения $< 1.5\%$.**

- 1. Оценим статистическую достоверность наблюдаемых средних эффектов.**
- 2. Рассмотрим варианты изменений в ионосфере, порождающие наблюдаемые эффекты.**

Будем моделировать амплитуду и временные характеристики воздействия - как будут меняться функция и плотность распределения по сравнению с фоновой. Для построения механизмов литосферно-ионосферной связи важно оценить, на сколько процентов должна увеличиться/уменьшиться плотность ионизации, чтобы модельные эффекты были близки к наблюдаемым средним сейсмоионосферным аномалиям.

Землетрясения $35 \leq H < 70$ км, $R < 600$ км, 77 Eqs



Наблюдается положительная вариация Δf (т.е. увеличение foF2) на (-8,...,-3) сутки, среднее значение 0.016, т.е. по сравнению с фоном увеличение foF2 на 1.1%; и отрицательная (т.е. уменьшение foF2) на (-1, ...+4) сутки, среднее значение – (-0.008), по сравнению с фоном уменьшение foF2 на 1.3%.

Рис. 5. Результат наложения эпох для Eqs $35 \leq H < 70$ км $R < 600$ км. Синяя- среднее за час, красная- сглаженное по 49 час (2 сут).

Сравним плотности распределения для «сейсмоионосферных вариаций» Δf , описанных выше, с вариациями в фоновое время. Определим, как и насколько должна измениться критическая частота foF2, чтобы получить наблюдаемый эффект.

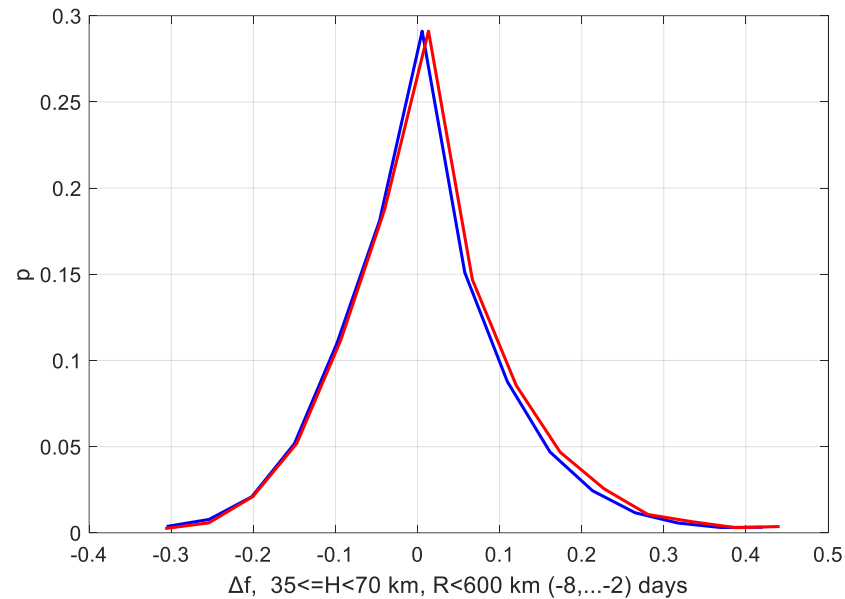


Рис. 6_1. Плотности распределения Δf для Eqс $35 \leq H < 70 \text{ km}, R < 600 \text{ km}, (-8, \dots -3)$ сутки, красная кривая (эффект) сдвинута вправо, наблюдается увеличение foF2.

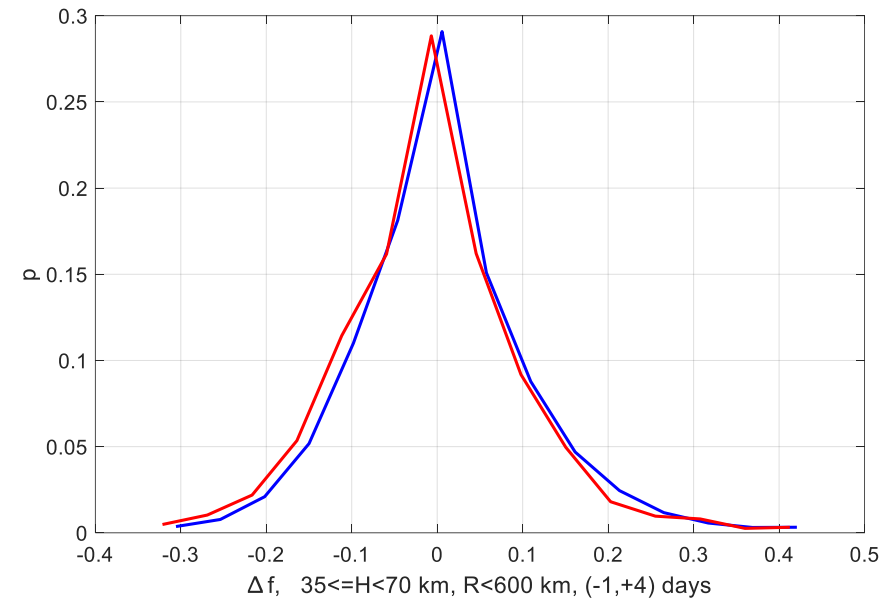


Рис. 6_2. Плотности распределения Δf для Eqс $35 \leq H < 70 \text{ km}, R < 600 \text{ km}, (-1, \dots +4)$ сутки, красная кривая (эффект) сдвинута влево, наблюдается уменьшение foF2.

Неглубокие землетрясения $H < 35$ км, $600 < R < 1000$ км, 67 Eqs

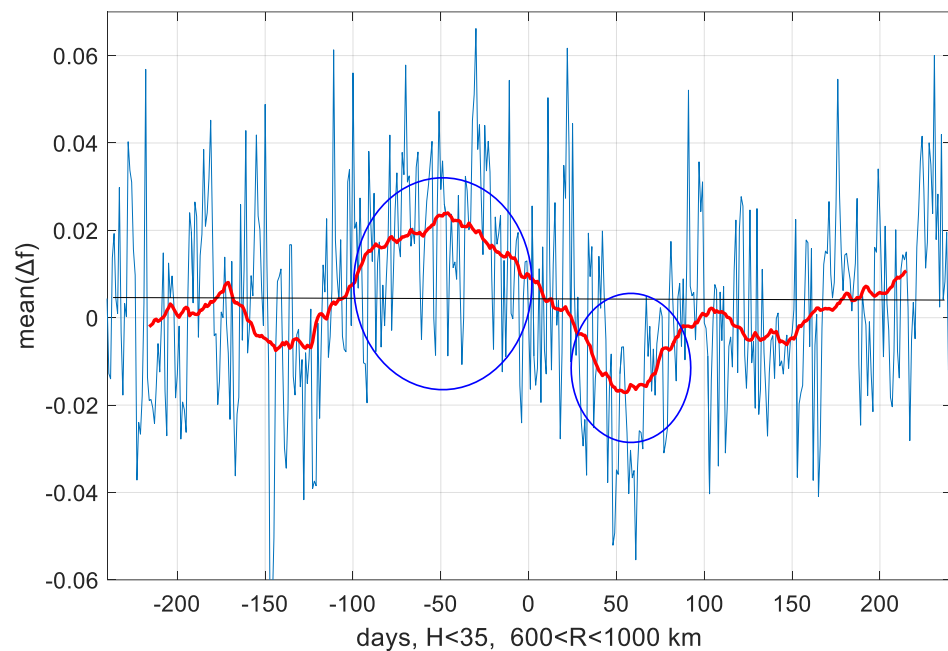


Рис. 7. Результат наложения эпох для 67 Eqs $H < 35$ км $600 < R < 1000$ км.

Наблюдается увеличение foF2 на (-4, ...-1) сутки, среднее значение вариаций $\text{mean}(\Delta f) = 0.017$, и далее уменьшение на (+2, ...+4) сутки, среднее значение вариаций $\text{mean}(\Delta f) = -0.014$.

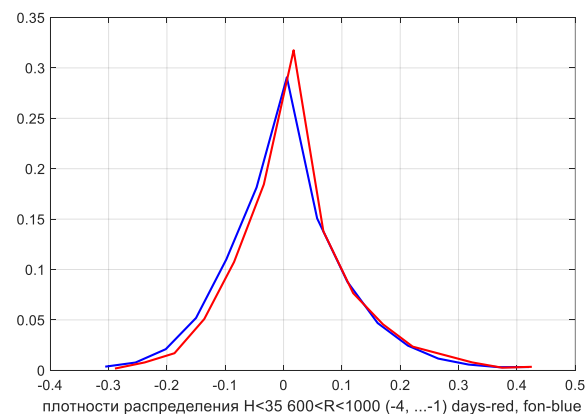


Рис. 7_1. Плотности распределения Δf на (-4, ...-1) сутки, красная кривая сдвинута вправо, в среднем увеличение Δf , фон-синий.

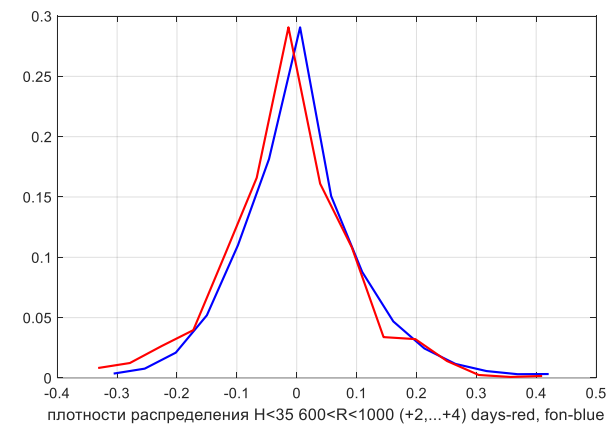


Рис. 7_2. Плотности распределения Δf на (+2, ...+4) сутки, красная кривая сдвинута влево, в среднем уменьшение Δf , фон-синий.

Предложим 2 варианта воздействия.

1. Ряд авторов перед землетрясениями отмечали **увеличение foF2 всплесками, причем иногда величина их доходила до 25%**. В случае всплесков одного знака у кривой плотности распределения увеличивалась либо правая ветвь-в случае положительных всплесков, либо левая- в случае отрицательных.

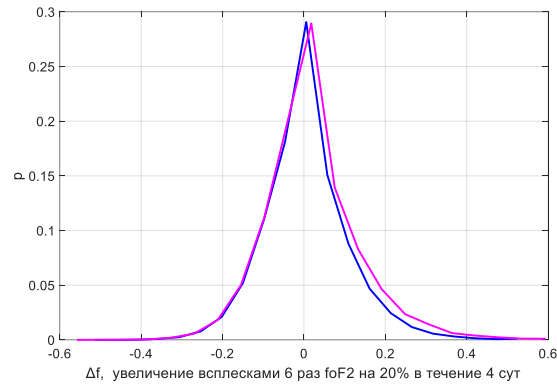


Рис. 8. Плотности распределения для модели -мажента и для фона- синяя линия. В течение 4 сут, 6 раз foF2 увеличилась на 20%.

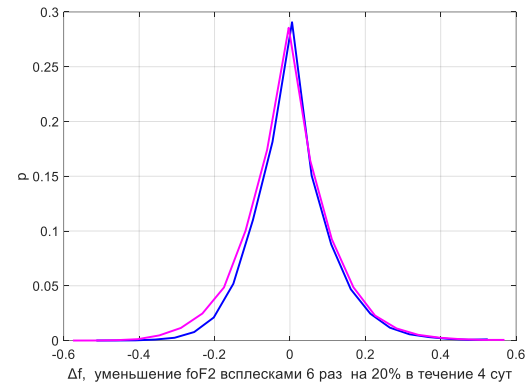


Рис. 9. Плотности распределения для модели -мажента и для фона- синяя линия . В течение 4 сут, 6 раз foF2 уменьшилась на 20%.

**Воздействие непрерывное равномерное в течение нескольких суток.
В этом случае наблюдается сдвиг кривой плотности распределения вправо- при
увеличении foF2 и влево при уменьшении foF2 .**

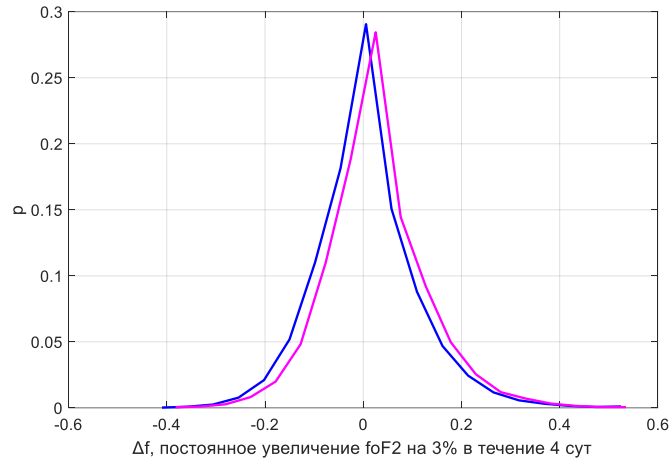


Рис. 10. Плотности распределения для модели -мажента и для фона- синяя линия, в течение 4 сут, плотность ионизации увеличивается на 6%, следовательно foF2 увеличивается на 3%. Сдвиг вправо.

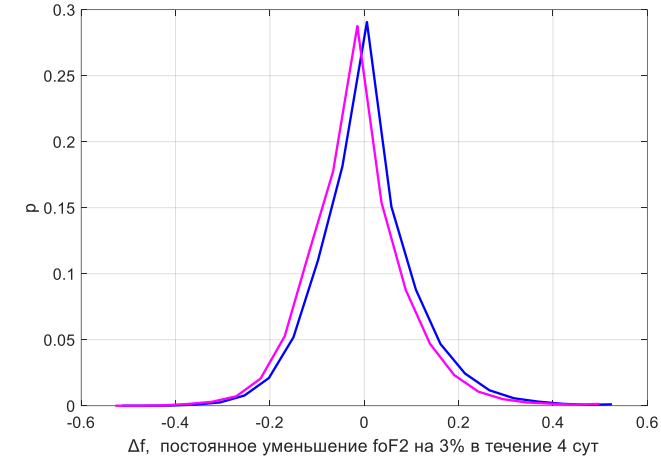


Рис. 11. Плотности распределения для модели -мажента и для фона- синяя линия, в течение 4 сут, плотность ионизации уменьшается на 6%, следовательно foF2 уменьшается на 3%. Сдвиг влево.

Предположим, что в связи с землетрясениями с глубиной $35 \leq H < 70$ км в течение нескольких суток происходит непрерывное равномерное воздействие, $foF2$ уменьшается на 3%. Проведем моделирование вариаций частоты $foF2$ с помощью случайного процесса.

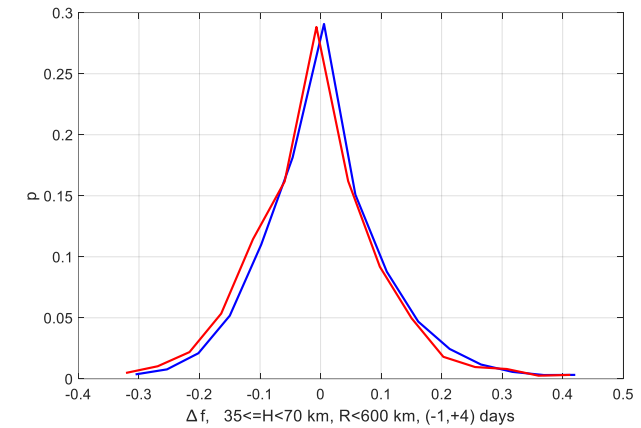
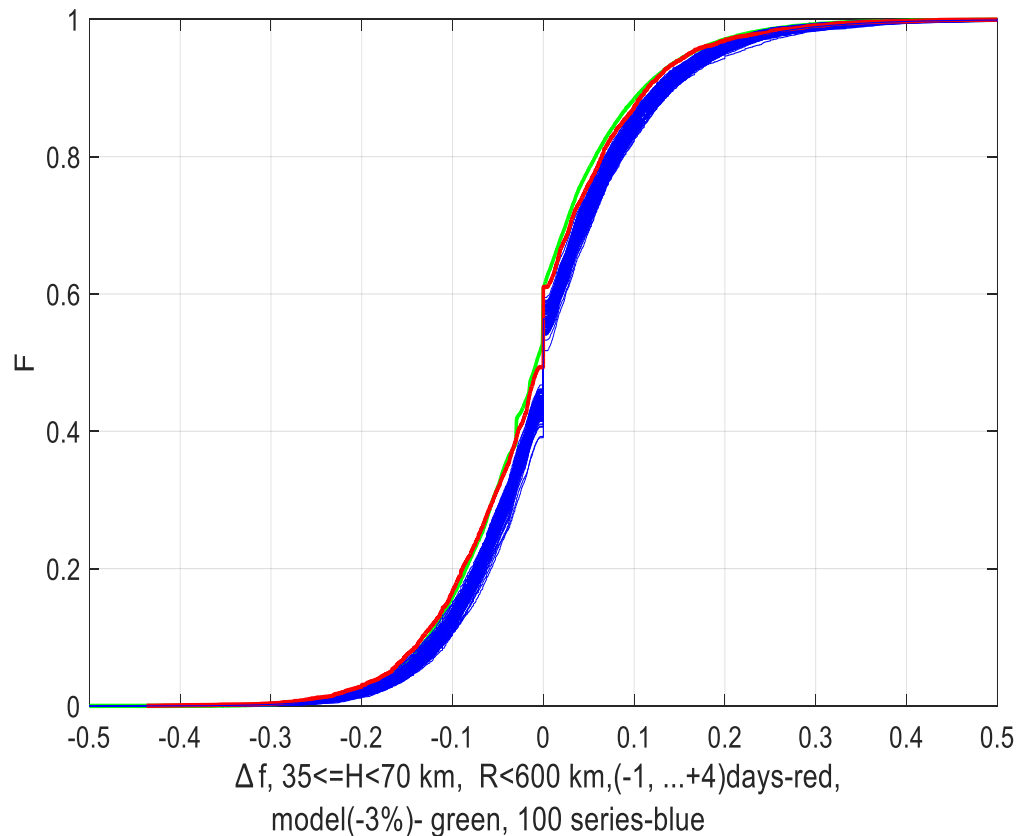


Рис. 12. Функции распределения для фона, для модельной аномалии и для реальных событий.

10 серий по 77 виртуальных событий (столько есть реальных зт), и для каждого их них в течение 121 час. уменьшим частоту $foF2$ на 3%; для этих данных повторим процесс вычисления Δf как для реальных землетрясений-зеленая кривая. Множество (100) реализаций фонового режима- синие кривые.

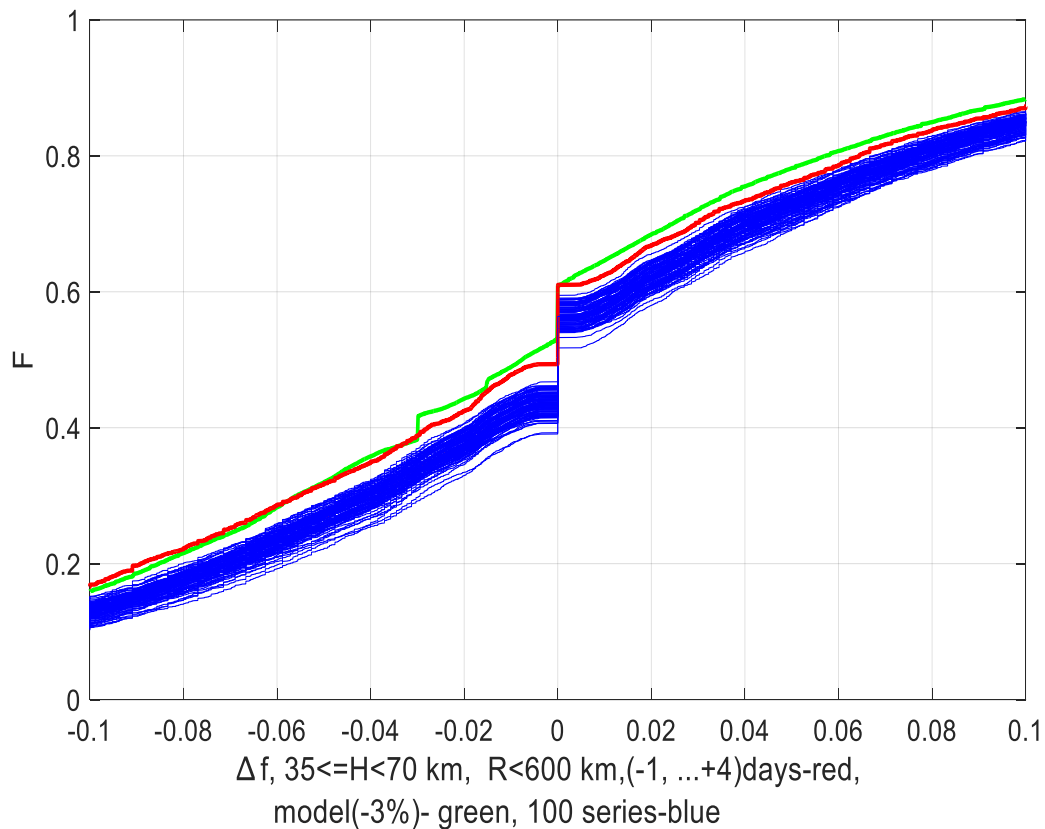


Рис. 12_1. Фрагмент Рис. 12. Функции распределения для фона- синяя, для виртуальных событий-зеленая, для реальных событий-красная линии.

Распределения Δf реальных и виртуальных землетрясений могут принадлежать общей генеральной совокупности (с вероятностью 25%), но оба распределения – значимо - с вероятностью более 99.5% - отличны от фонового.

Использован критерий Смирнова.

Для всех обсуждавшихся выше аномалий- как для более глубоких, так и для менее глубоких землетрясений, наблюдались сдвиг кривых плотности распределения относительно фона либо вправо, либо влево. В первом приближении все эти случаи можно моделировать изменением часовых значений foF2 на 2-3%.

Выводы

1. По данным ст. В.З. Kokuninji (Токио) за 1957-2020 гг. показано наличие различных статистически достоверных аномалий для землетрясений $M6+$ с $H < 35$ км и $35 \leq H < 70$ км.
2. Предложен и реализован метод выделения систематических аномалий из сильного шума.
3. Для землетрясений с $35 \leq H < 70$ -км положительные вариации $foF2$ имеют место на расстояниях до 600 км от эпицентра за 2-8 суток до события, затем аномалия меняет знак и продолжается до 4 суток после события.
4. Для землетрясений $H < 35$ км положительные вариации $foF2$ имеют место на расстояниях 600-1000 км от эпицентра за 1-4 суток до события. После землетрясения аномалия меняет знак.
5. Средние амплитуды сейсмоионосферных вариаций $foF2$ составили 1-2%. Достоверность всех перечисленных вариаций превышает 98%.
6. Проведено моделирование аномалий при различных предположениях - допускалось 1) изменение среднего уровня $foF2$ и 2) импульсные изменения $foF2$.
7. Наблюдаемые аномалии могут формироваться плавным изменением фонового значения $foF2$ (2-3%) в течение нескольких суток.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!