

**Идентификация возмущений в слое F2 ионосферы,
предшествующих наступлению землетрясений с
магнитудой $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе**

А.В. Павлов

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Россия

Введение

Исследования аномального поведения геофизических параметров, в частности, в таких геосферных оболочках, как атмосфера и ионосфера, регистрируемое в сейсмоактивных районах, могут быть полезны при поиске предвестников сильных землетрясений.

Эффекты в ионосфере могут проявляться как до наступления сейсмических событий, так и после них. Наиболее известные гипотезы объясняют появление сейсмоионосферных аномалий проникновением в ионосферу сейсмогенного электрического поля и/или акустико-гравитационных волн (АГВ), которые возбуждаются в приземной атмосфере над зоной подготовки землетрясения.

Одной из важнейших характеристик ионосферных предвестников землетрясений является их локальный характер. Размер измененной области в ионосфере может иметь тот же порядок, что и размер области подготовки землетрясения на поверхности земли.

Одним из наиболее часто рассматриваемых параметров ионосферы в связи с поиском предвестников землетрясений является критическая частота f_oF2 слоя $F2$, непосредственно связанная с концентрацией электронов на высоте главного максимума ионосферы.

Целью данного исследования является поиск возмущений в ионосфере, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе, на основе анализа ежечасных значений критической частоты f_oF2 , зарегистрированных на опорной и контрольной ионосферных станции. В качестве опорной станции, расположенной в исследуемом сейсмоактивном регионе, рассматривалась ионосферная станция PETROPAVLOVSK (PK553, географические координаты $\varphi=52.97^\circ$ с.ш., $\lambda=158.24^\circ$ в.д.), когда эта станция входила в зону их подготовки на поверхности Земли. В качестве контрольной станции была выбрана ионосферная станция EARECKSON (EA653, географические координаты $\varphi=52.97^\circ$ с.ш., $\lambda=158.24^\circ$ в.д.).

Для анализа использован каталог землетрясений, составленный Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН". Рассматривались землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$ и глубинами гипоцентра $h \leq 300$ км, произошедшие в Камчатском регионе за временной интервал $T=01.10.2018-07.12.2023$ гг.

Опорная ионосферная станция PETROPAVLOVSK (PK553), п-ов Камчатка, координаты станции: 52.97° с.ш., 158.24° в.д.

Контрольная станция EARECKSON (EA653), Алеутский острова, координаты станции: 52.7 ° с.ш., 185.9 в.д. (<http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>)

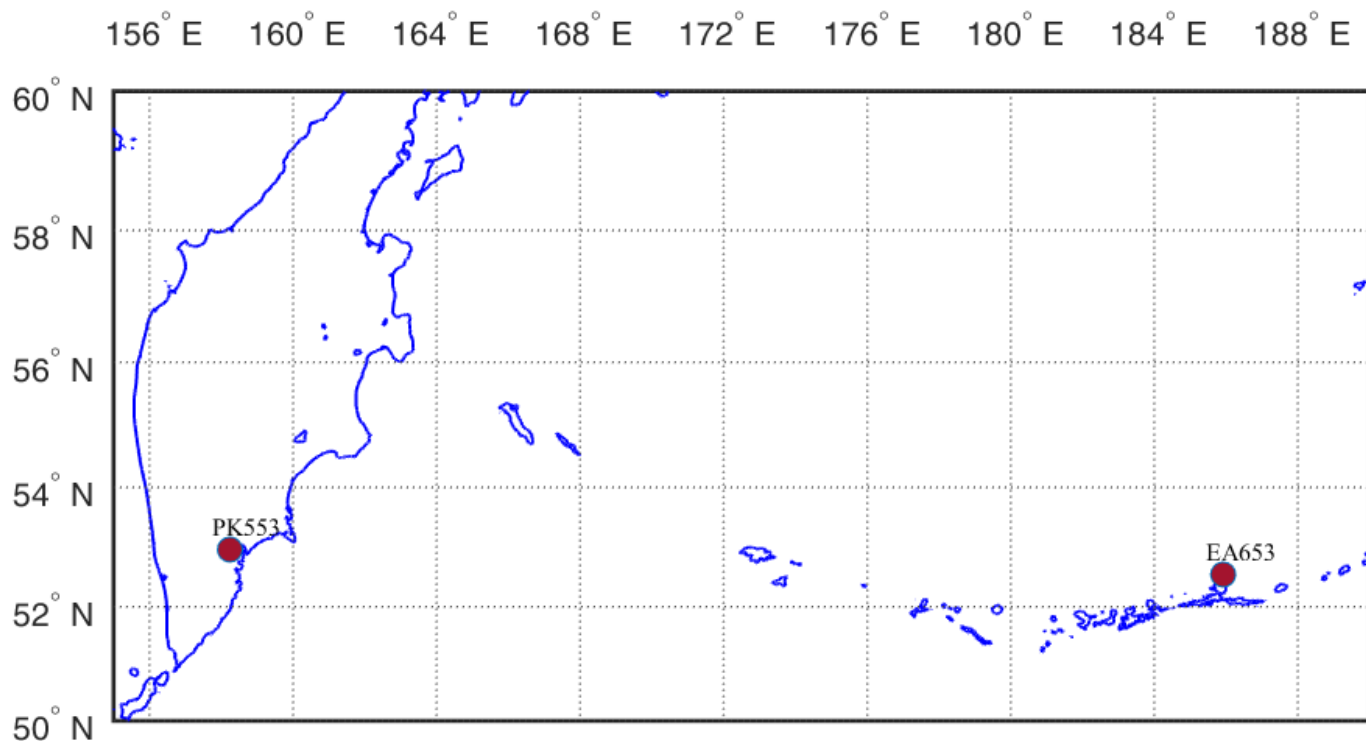


Рис. 1. Расположение ионосферных станций PK553 и EA653.

Для каждого землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$ по формуле Добровольского $R_D = 10^{0.43M}$ определялся радиус зоны его подготовки на поверхности Земли, а также определялось расстояние $R_{\text{Э}}$ от эпицентра землетрясения до наземной станции вертикального зондирования ионосферы PETROPAVLOVSK. В случае, если оказывалось, что $R_{\text{Э}} \leq R_D$, то эти сейсмические события отбирались для дальнейшего анализа. Таким образом, всего было отобрано $N=19$ землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, удовлетворяющих этому условию.

Идентификация возможных сейсмоионосферных аномалий по данным опорной и контрольной ионосферных станций

$$Y_{\pm}(t_i) = foF2_{\text{med}}(t_i) \pm 1.5IQR(t_i)$$

$foF2_{\text{med}}(t_i)$ – медиана за предшествующий временной интервал $T_{\text{med}}=30$ суток, вычисляемая только по тем суткам, в которых трехчасовые значения $Kp \leq 2_0$.

$IQR(t_i) = Q_3(t_i) - Q_1(t_i)$ – межквартильный размах;

$Q_1(t_i)$ и $Q_3(t_i)$ – нижний (первый) и верхний (третий) квартили, вычисляемые по суткам, в которых трехчасовые значения $Kp \leq 2_0$;

$Y_{\pm}(t_i)$ – границы диапазона фоновых значений.

- 1) Для обеих станций на исследуемом временном интервале $T_{\text{ан}}$ определялись отклонения Δf_+ и Δf_- значений $foF2$, выходящие за пределы соответственно верхней Y_+ и нижней Y_- границы диапазона фоновых значений: $\Delta f_+ = foF2 - Y_+$ и $\Delta f_- = foF2 - Y_-$. В случае отклонения значений $foF2$ от верхней границы Y_+ ($\Delta f_+ > 0$) аномалия считалась "положительной", а при отклонении от нижней границы Y_- ($\Delta f_- < 0$) – "отрицательной".
- 2) Выбирались "положительные" и "отрицательные" отклонения Δf_+ и Δf_- на опорной станции, длительность которых составляла $\Delta t \geq 1.5$ часа (с учетом усреднения $foF2$ в скользящем окне по трём точкам).
- 3) Ионосферное возмущение Δf_+ или Δf_- рассматривалось как ионосферный предвестник землетрясения, когда на всем временном интервале длительностью сутки $[t_0 - 12 \text{ часов}; t_0 + 12 \text{ часов}]$, где t_0 – время появления соответствующей ионосферной аномалии Δf_+ или Δf_- выполнялись условия:
 - Значения геомагнитных индексов $Kp \leq 2_0$ и Dst в интервале от -20 нТл до 20 нТл;
 - отсутствуют возмущения Δf_+ или Δf_- по данным контрольной станции;
 - отсутствуют пропуски измерений $foF2(t_i)$ на контрольной станции.

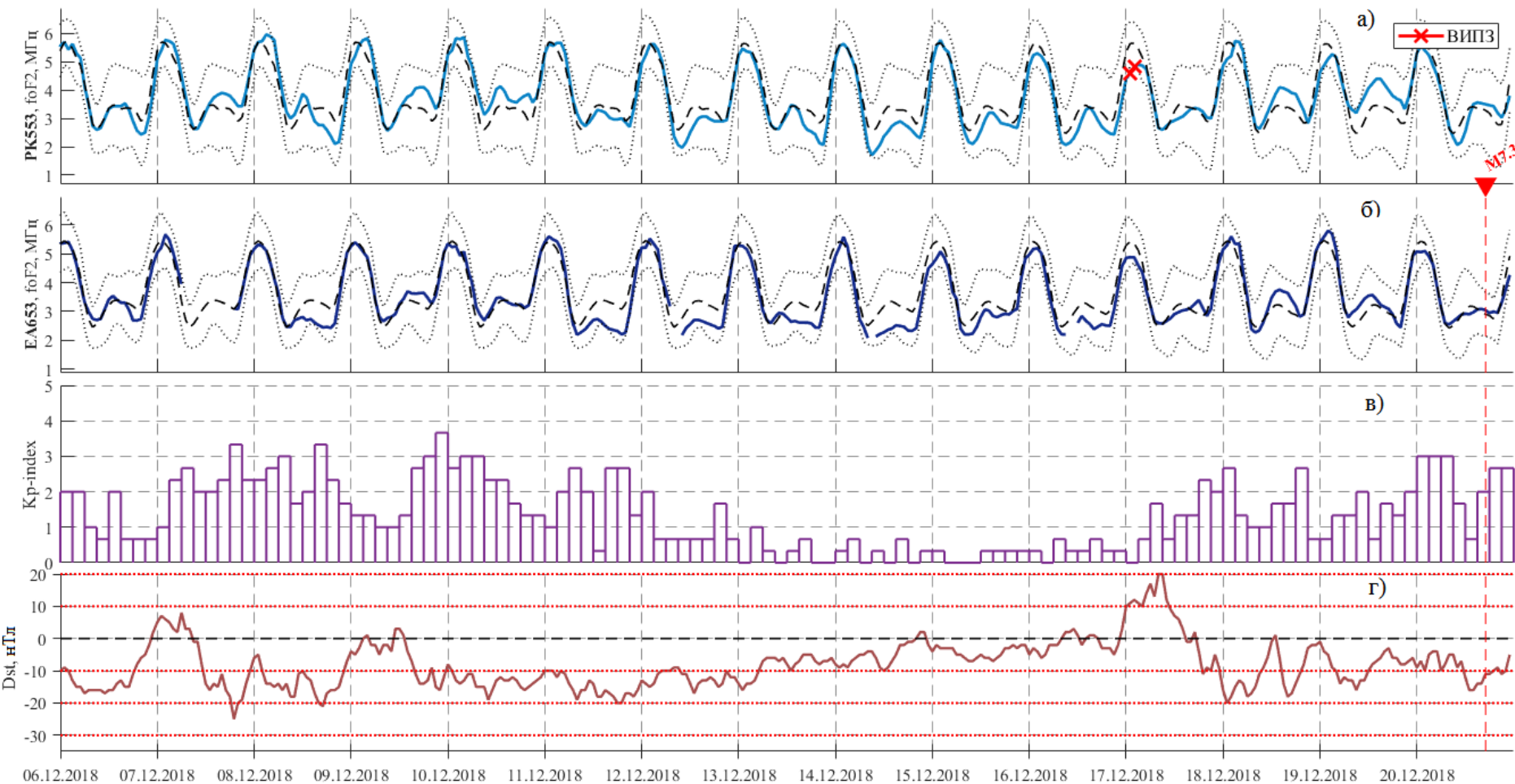


Рис. 2. Временные ряды геофизических параметров (UT) за 06.12.2018–20.12.2018 гг.: $foF2$, измеренные на опорной ионосферной станции PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной ионосферной станции EARECKSON (б); Kp -индекс (в); Dst -индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 20.12.2018 17:01:54 (UT) с магнитудой $M=7.3$. Пунктирными линиями отмечены границы Y_{\pm} , а выходящие за эти границы полосы вариации $foF2$ (ионосферная аномалия, предшествующая наступлению землетрясения) отмечены красным маркером 'x'.

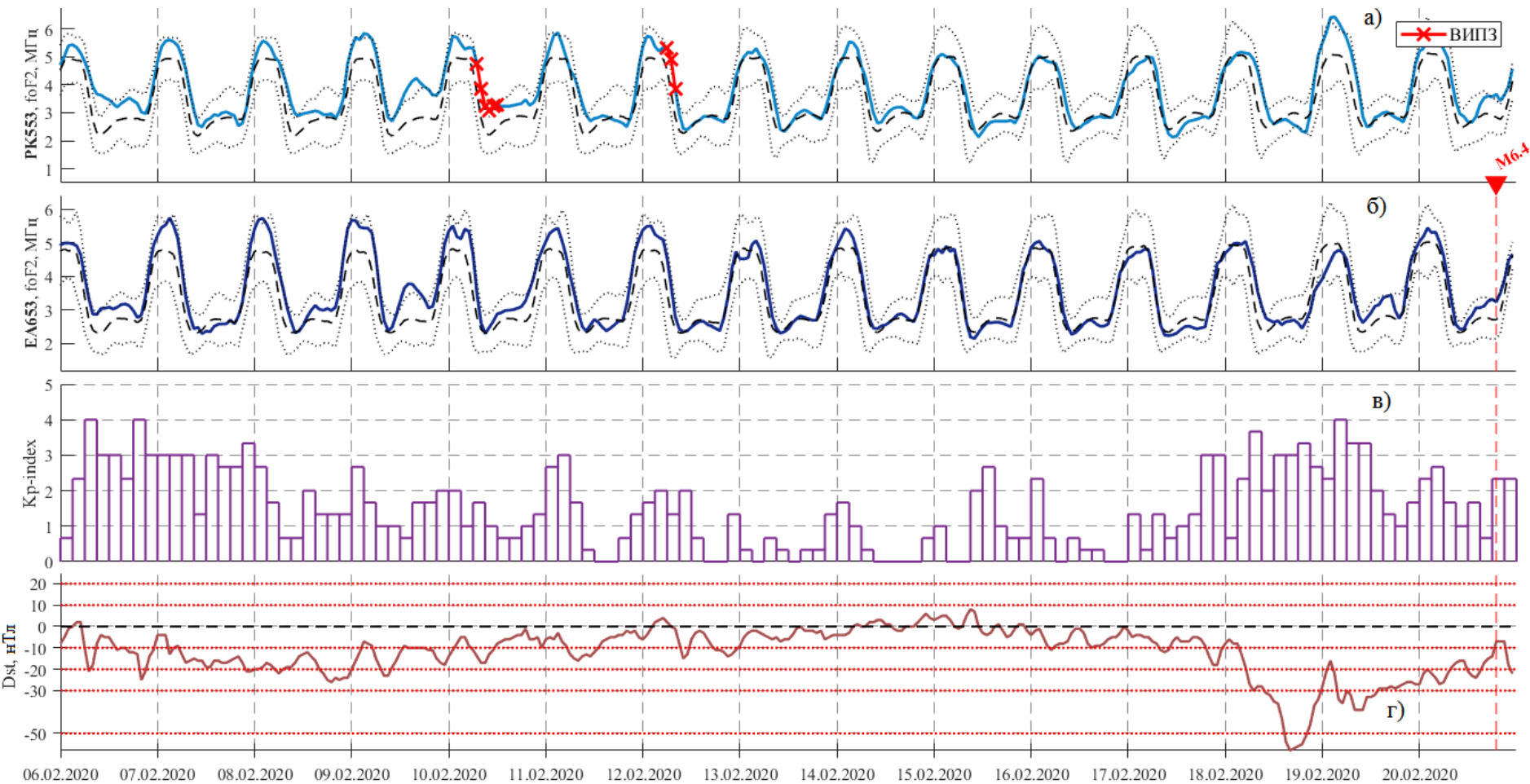


Рис. 3. Временные ряды геофизических параметров (UT) за 06.02.2020–20.02.2020 гг.: $foF2$, измеренные на опорной ионосферной станции PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной ионосферной станции EARECKSON (б); Kp -индекс (в); Dst -индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 20.02.2020 18:57:34 (UT) с магнитудой $M=6.4$. Пунктирными линиями отмечены границы Y_{\pm} , а выходящие за эти границы полосы вариации $foF2$ (ионосферная аномалия, предшествующая наступлению землетрясения) отмечены красным маркером 'x'.

Таблица 1. Характеристики ионосферных возмущений, соотнесенные с землетрясениями с магнитудой $M \geq 6.0$.

| № | Время ЗТ, UT | φ° , с.ш. | λ° , в.д. | h , км | K_s | M | R_Σ , км | R_D , км | ΔT (сутки) | $\delta f, \%$ | $\delta Y, \%$ |
|---|---------------------|------------------------|------------------------|----------|-------|-----|-----------------|------------|-----------------------|----------------|----------------|
| 1 | 2018.12.20 17:01:53 | 54.91 | 164.71 | 54 | 16.1 | 7.3 | 475.01 | 1377.21 | 3.67 | -14.45 | -1.36 |
| 2 | 2019.03.28 22:06:48 | 50.51 | 160.07 | 49 | 14 | 6.3 | 301.14 | 511.68 | 5.46 | 26.32 | 2.13 |
| 3 | 2020.01.22 11:04:11 | 54.74 | 161.85 | 83 | 14.3 | 6.4 | 307.82 | 564.94 | 9.88 | -21.35 | -4.44 |
| 4 | 2020.02.20 18:57:34 | 53.44 | 160.92 | 52 | 14.3 | 6.4 | 185.97 | 564.94 | 10.5 | 40.91 | 8.77 |
| 5 | 2020.03.25 02:49:19 | 49.11 | 158.08 | 48 | 16.8 | 7.7 | 429.36 | 2046.44 | 11.16 | 11.85 | 0.92 |
| 6 | 2021.03.16 18:38:21 | 54.64 | 163.35 | 64 | 14.6 | 6.6 | 383.37 | 688.65 | 6.19 | 15.96 | 1.4 |
| 7 | 2022.05.16 05:25:50 | 50.34 | 156.55 | 89 | 13.9 | 6.2 | 314.8 | 463.45 | 9.27 | -13.19 | -2.77 |
| 8 | 2023.03.08 06:03:36 | 50.16 | 157.79 | 66 | 14.1 | 6.3 | 314 | 511.68 | 11.46 | 47.06 | 18.24 |
| 9 | 2023.04.18 02:40:51 | 53.94 | 160.25 | 123 | 13.5 | 6 | 171.29 | 380.19 | 1.49 | 21.15 | 6.11 |

φ, λ – широта и долгота эпицентра землетрясения;

h – глубина гипоцентра землетрясения;

K_s – энергетический класс землетрясения;

M – магнитуда землетрясения;

R_D – радиус зоны подготовки землетрясения на поверхности земли по оценке Добровольского;

R_Σ – расстояние от эпицентра землетрясения до ионосферной станции PETROPAVLOVSK;

ΔT – время упреждения ионосферного возмущения момента землетрясения;

$\delta f = \text{sign}(foF2(t_i) - foF2_{\text{med}}(t_i)) \max[100 \times (foF2(t_i) - foF2_{\text{med}}(t_i)) / foF2_{\text{med}}(t_i)]$ – относительное отклонение от медианы;

$Y_{\pm} = \text{sign}(foF2(t_i) - Y_{\pm}(t_i)) \max[100 \times (foF2(t_i) - Y_{\pm}(t_i)) / Y_{\pm}(t_i)]$ – относительное отклонение от уровня Y_{\pm} ;

При анализе предвестников землетрясений по данным аномалий в геофизических полях, которые непосредственно связаны с литосферой (геодезические измерения, наклоны земной поверхности, уровень подземных вод, электротеллурическое поле, деформации, магнитное поле, скорости сейсмических волн), используются зависимости вида:

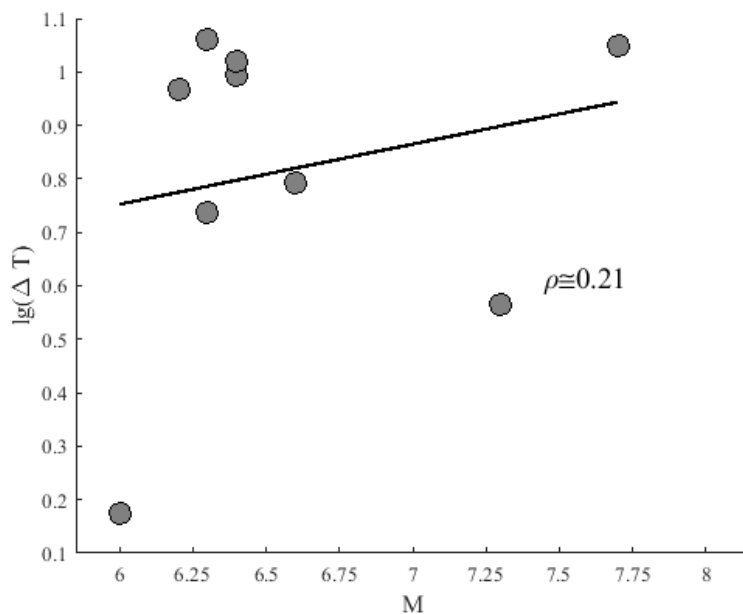
$$\lg[\Delta T]=aM+b$$

$$\lg[\Delta T \times r]=aM+b,$$

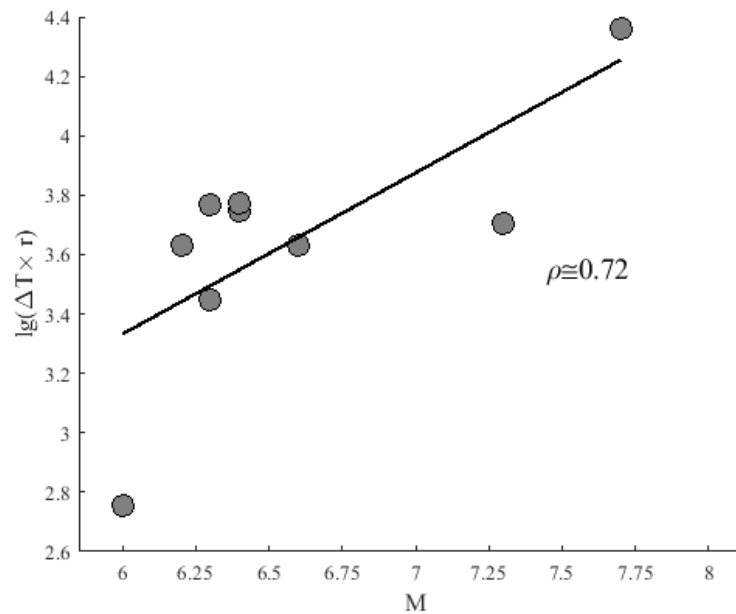
где a и b – численные коэффициенты линейной регрессии,

M – магнитуда землетрясения,

ΔT (сутки) и r (км) – время упреждения соответствующим предвестником момента землетрясения и расстояние от эпицентра до станции наблюдения соответственно.



а)



б)

Рис. 4. Линейные регрессии $\lg[\Delta T]=0.11+0.08$ (а) и $\lg[\Delta T \times r]=0.54+0.08$ (б) для идентифицированных ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, соответственно без учёта и с учётом эпицентрального расстояния r .

Оценка прогностической эффективности возмущений F2-слоя ионосферы

Надежность предвестника:

$$R = \frac{n(E_A)}{n(E)}$$

$n(E_A)$ – количество землетрясений, для которых был выделен предвестник;
 $n(E)$ – общее число всех землетрясений.

Достоверность предвестника:

$$V = \frac{n(A_E)}{n(A)}$$

$n(A_E)$ – число предвестниковых аномалий; $n(A)$ – общее число всех землетрясений.

Эффективность прогноза по методике А.А. Гусева:

$$J_G = \frac{N_+ / T_{ож}}{N_{общ} / T_n}$$

N_+ – количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу;

$N_{общ}$ – общее количество произошедших землетрясений, которые должны были быть спрогнозированы;

$T_{ож}$ – общее время ожидания (тревог);

T_n – общее время наблюдения.

Эффективность J_G показывает, во сколько раз скорость потока спрогнозированных землетрясений превышает среднюю за время наблюдений T , т.е. является отношением вероятности землетрясения во время тревоги к их средней вероятности. В отсутствие связи "предвестник-землетрясение", т.е. при случайном угадывании, эффективность J_G равна 1.

Эффективность прогноза по методике Г.М. Молчана:

$$J_M = 1 - \nu - \tau$$

$$\tau = \frac{T_{\text{тревоги}}}{T} \quad \text{– относительный объем тревог}$$

$$\nu = 1 - \frac{N_+}{N} \quad \text{– доля пропусков цели}$$

Для случайного прогноза $J_M=0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) – $J_M=1$.

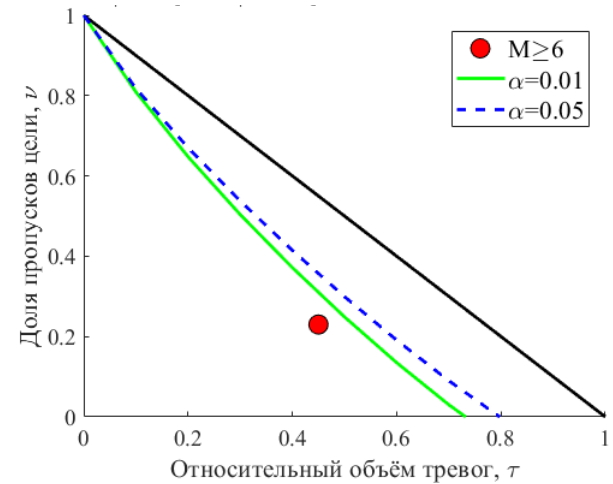


Рис.5. Диаграмма ошибок

Эффективность прогноза на основе оценки Ханссена-Койпера

$$R_{score} = \frac{a}{a+b} - \frac{c}{c+d}$$

a – число дней с землетрясениями и с объявленным режимом их ожидания; b – число дней с землетрясениями и без режима их ожидания; c – количество дней без землетрясений и с объявленным режимом их ожидания; d – количество дней без землетрясений и без режима их ожидания. Оценка R_{score} представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинного предвестника землетрясения и вероятностью обнаружения ложного предвестника. Величина R_{score} может принимать значения в диапазоне от -1 до 1 , при этом последнее означает стопроцентную вероятность обнаружения истинного предвестника при отсутствии ложных “тревог”.

Таблица 2. Прогностическая эффективность критической частоты $foF2$ ионосферного слоя $F2$. для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$.

| $T_{ожж.}(сутки)$ | N_+ | N | $n(A_E)$ | $n(A)$ | R | V | J_G | τ | v | J_M | R_{score} |
|-------------------|-------|-----|----------|--------|------|------|-------|--------|------|-------|-------------|
| 8.78 ± 5.56 | 9 | 19 | 9 | 64 | 0.47 | 0.14 | 1.64 | 0.29 | 0.53 | 0.18 | 0.19 |

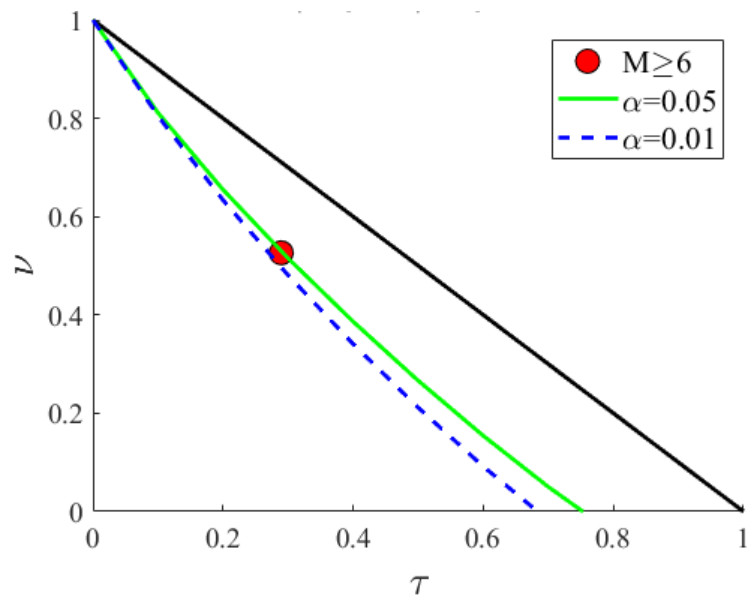


Рис. 6. Диаграмма ошибок для методики прогноза по возмущениям $foF2$ опорной станции РК553 для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$.

Заключение

- В результате проведенного сравнительного анализа критической частоты за временной интервал 01.10.2018–07.12.2023 гг. в условиях низкой геомагнитной активности на ионосферных станциях PETROPAVLOVSK (опорная) и EARECKSON (контрольная) были выделены ионосферные возмущения, предшествовавшие наступлению землетрясений с магнитудой с $M \geq 6.0$.
- Было рассмотрено 19 землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших в окрестности станции PETROPAVLOVSK, когда опорная станция входила в зону подготовки соответствующих землетрясений, при этом ионосферные возмущения были обнаружены перед наступлением 47% землетрясений рассматриваемого диапазона магнитуд. Время упреждения проявления ионосферных аномалий составляло примерно от 1.49 суток до 11.46 суток до момента наступления сейсмических событий. В среднем, на фоне низкой геомагнитной активности, длительность ионосферных возмущений была около 3 часов, максимальная амплитуда $foF2$ относительно медианных значений составляла 47.06%, а максимальное относительное отклонение $foF2$ от границ фоновых значений составляло 18.24%.
- В соответствии с результатами проведенной оценкой прогностической эффективности, представленные ионосферные возмущения могут рассматриваться как возможные краткосрочные ионосферные предвестники землетрясений, так как появлялись только в окрестности станции PETROPAVLOVSK на фоне низкой геомагнитной активности.
- Применение данного подхода в сочетании с анализом других геофизических параметров, которые могут быть отождествлены с предвестниками землетрясений, может быть полезным для прогнозирования периодов повышения сейсмической активности.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!