

**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  $foF2$  слоя  $F2$ , непосредственно связанная с концентрацией электронов на высоте главного максимума ионосферы.

Целью данного исследования является поиск возмущений в ионосфере, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудами  $M \geq 6.0$  в Камчатском регионе, на основе анализа ежечасных значений критической частоты  $foF2$ , 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 глубиной 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>)

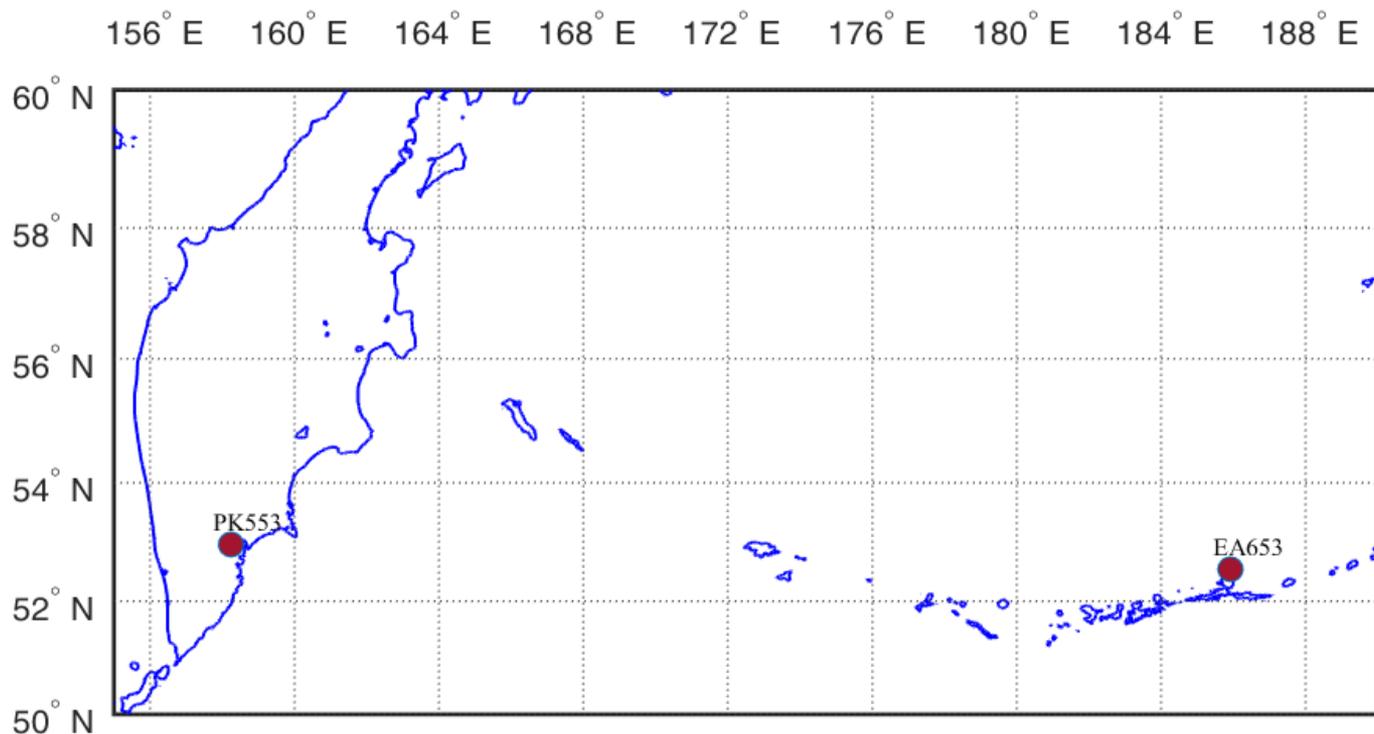


Рис. 1. Расположение ионосферных станций PK553 и EA653.

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 рассчитывалось 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  $Kp \leq 2_0$ .

- 1) Для обеих станций на исследуемом временном интервале  $T_{\text{ан}}$  определялись отклонения  $\Delta f_+$  и  $\Delta f_-$  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  $\Delta f_+$  и  $\Delta f_-$  на опорной станции, длительность которых составляла  $\Delta t \geq 1.5$  часа (с учетом усреднения  $foF2$  в скользящем окне по трем точкам).
- 3) Ионосферное возмущение  $\Delta f_+$  или  $\Delta f_-$  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  $\Delta f_+$  или  $\Delta f_-$  выполнялись условия:
  - Значения геомагнитных индексов  $Kp \leq 2_0$  и  $Dst$   $[-20 \text{ нТл}; 20 \text{ нТл}]$ ;
  - отсутствуют возмущения  $\Delta f_+$  или  $\Delta f_-$  по данным контрольной станции;
  - отсутствуют пропуски измерений  $foF2(t_i)$  на контрольной станции.

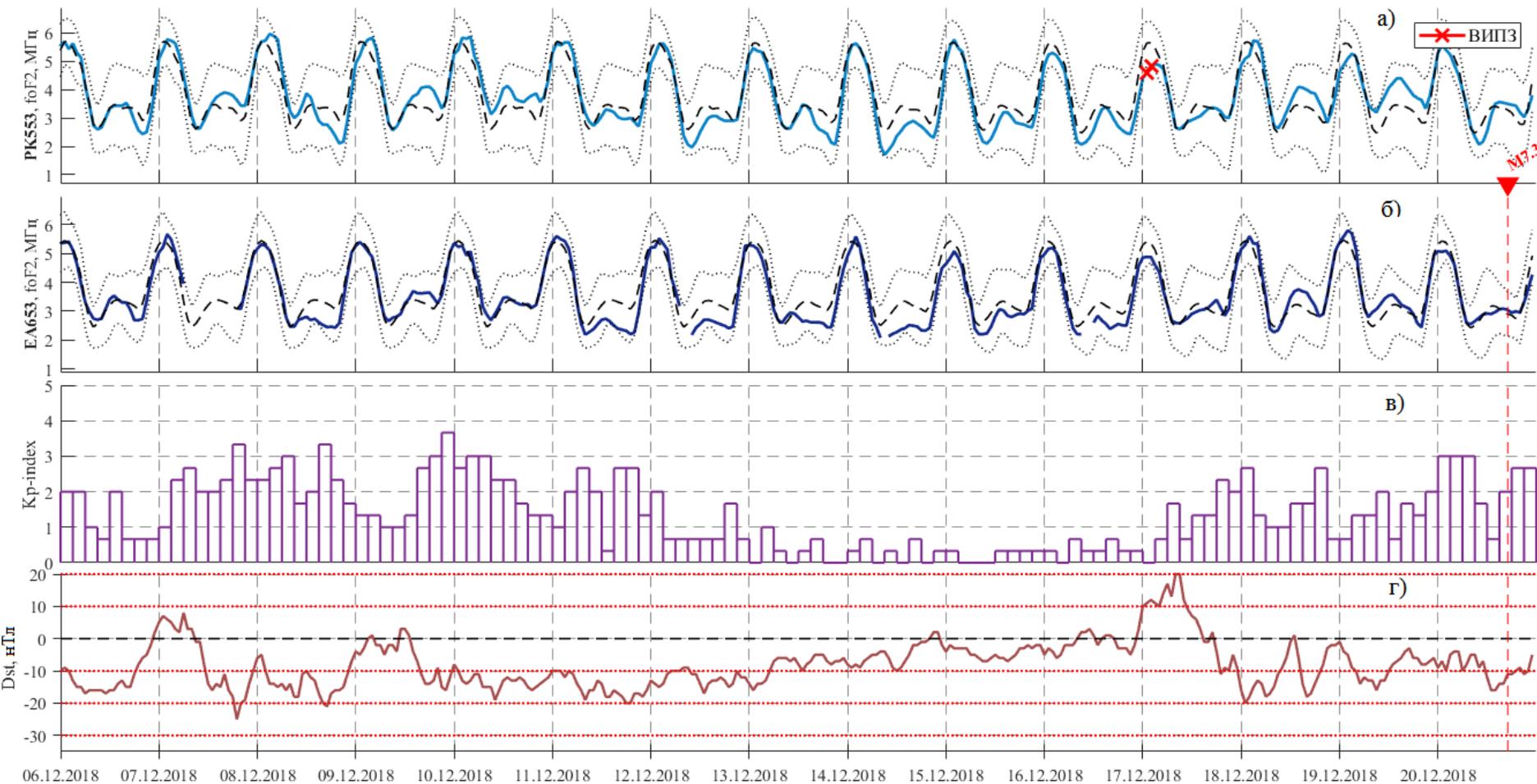


Рис. 2. Временные ряды геофизических параметров (UT) за 06.12.2018–20.12.2018 гг.:  $foF2$ , измеренные на опорной ионосферной станции PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной ионосферной станции EARECKSON (б);  $Kp$ -индекс (в);  $Dst$ -индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 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'.

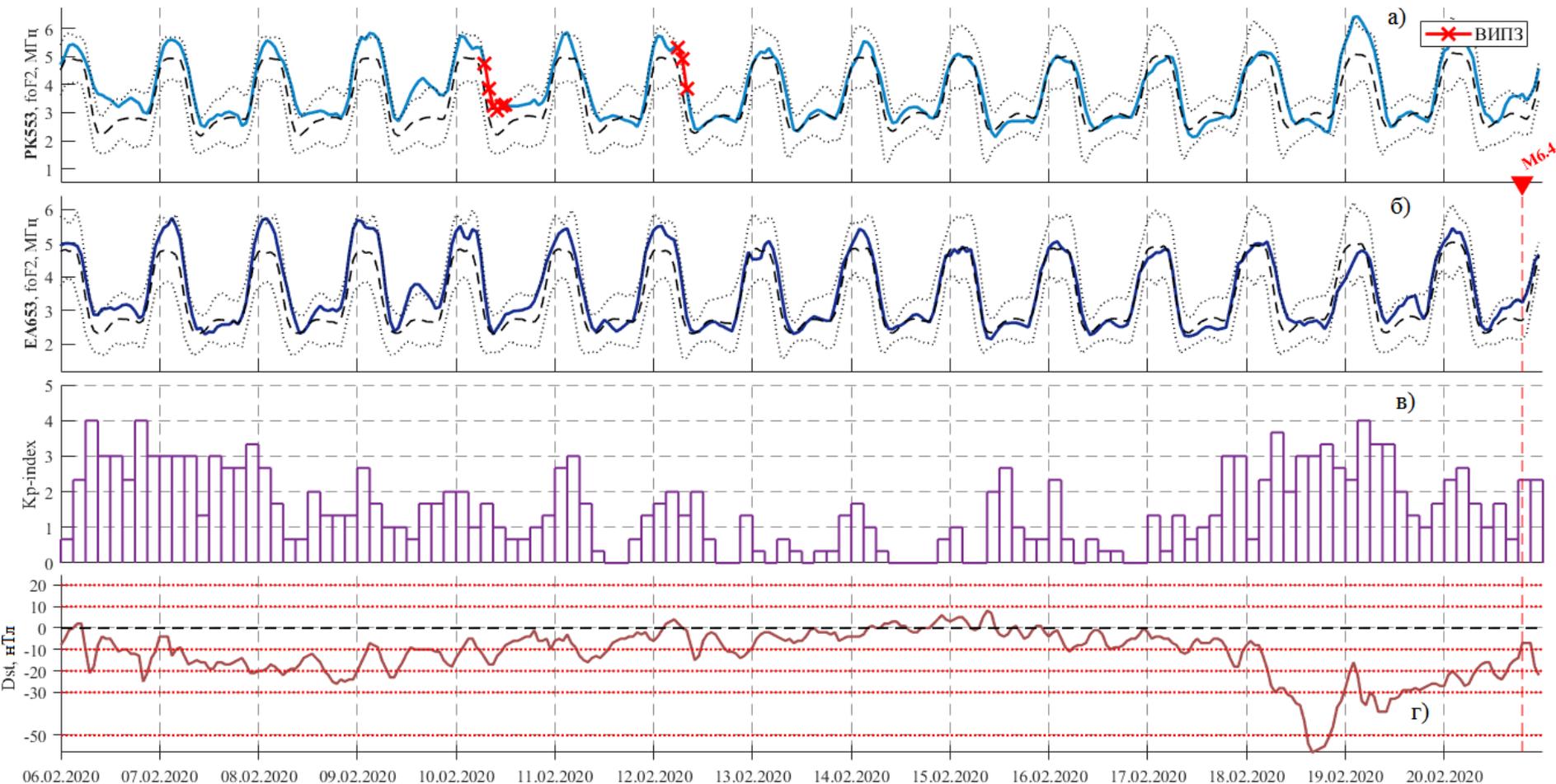


Рис. 3. Временные ряды геофизических параметров (UT) за 06.02.2020–20.02.2020 гг.:  $foF2$ , измеренные на опорной ионосферной станции PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной ионосферной станции EARECKSON (б);  $Kp$ -индекс (в);  $Dst$ -индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 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	$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.	$h$ , км	$K_s$	$M$	$R_{\text{Э}}$ , км	$R_D$ , км	$\Delta T$ (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

$\varphi, \lambda$  – широта и долгота эпицентра землетрясения;

$h$  – глубина гипоцентра землетрясения;

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

$R_{\text{Э}}$  – расстояние от эпицентра землетрясения до ионосферной станции PETROPAVLOVSK;

$\Delta T$  – время упреждения ионосферного возмущения момента землетрясения;

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

$Y_{\pm} = \text{sign}(foF2(t_i) - Y_{\pm}(t_i)) \max[100 \times (foF2(t_i) - Y_{\pm}(t_i)) / Y_{\pm}(t_i)]$  – относительные отклонения 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,

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

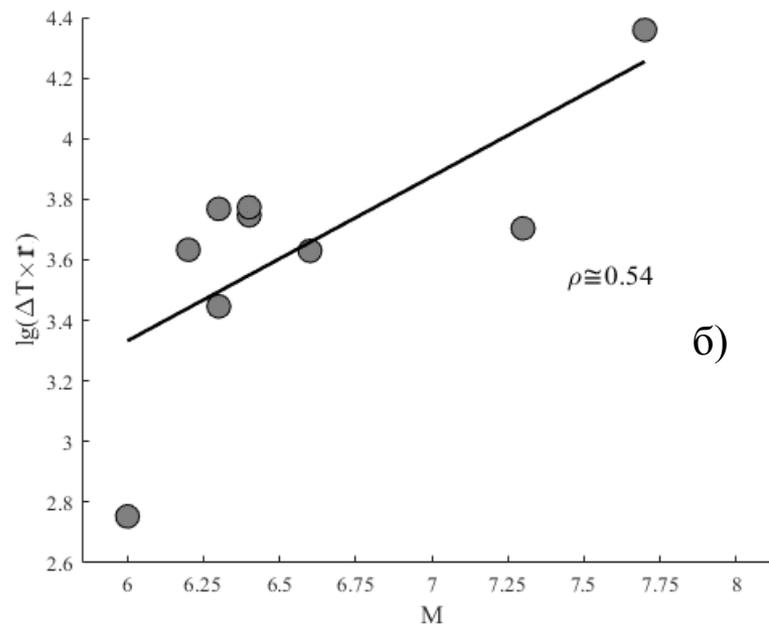
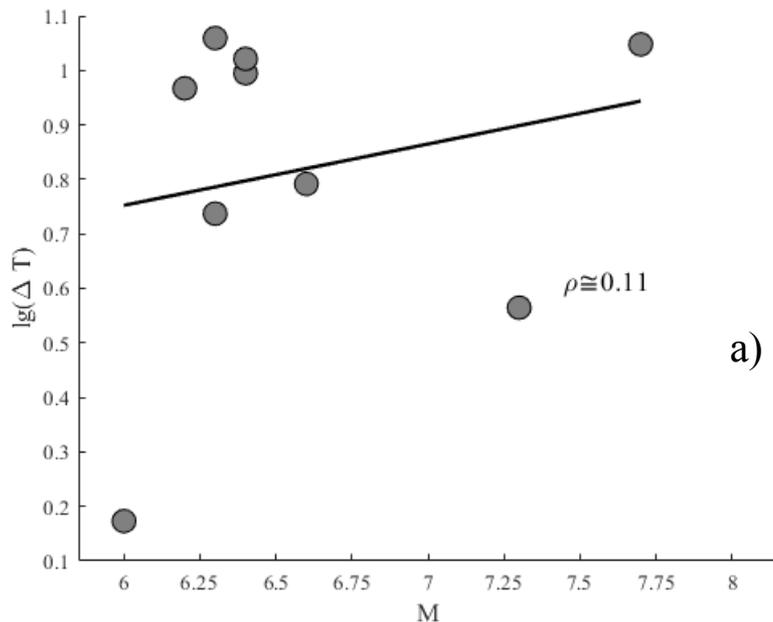


Рис. 4. Линейные регрессии  $\lg[\Delta T]$  (а) и  $\lg[\Delta T \times r]$  (б) для идентифицированных ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений, соответственно без учёта и с учётом эпицентрального расстояния  $r$ .

## 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) –  $J_M=1$ .

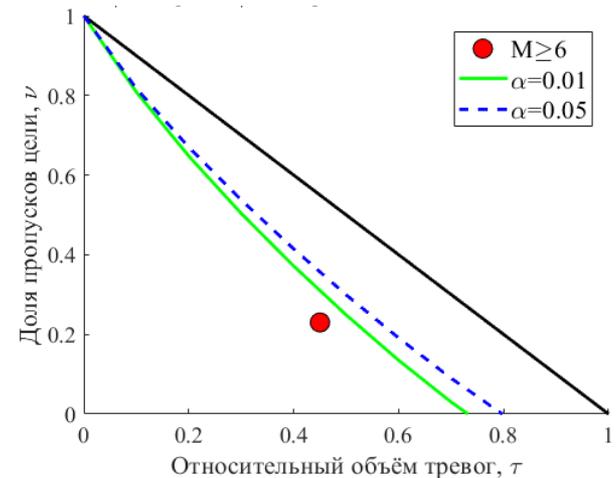


Рис.5. Диаграмма ошибок

Эффективность прогноза на основе оценки Ханссена-Койпера

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

$a, b$  – число дней с землетрясениями с тревогами и без них соответственно,

$c, d$  – количество дней без землетрясений с тревогой и без нее соответственно.

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 магнитудами  $M \geq 6.0$ .

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

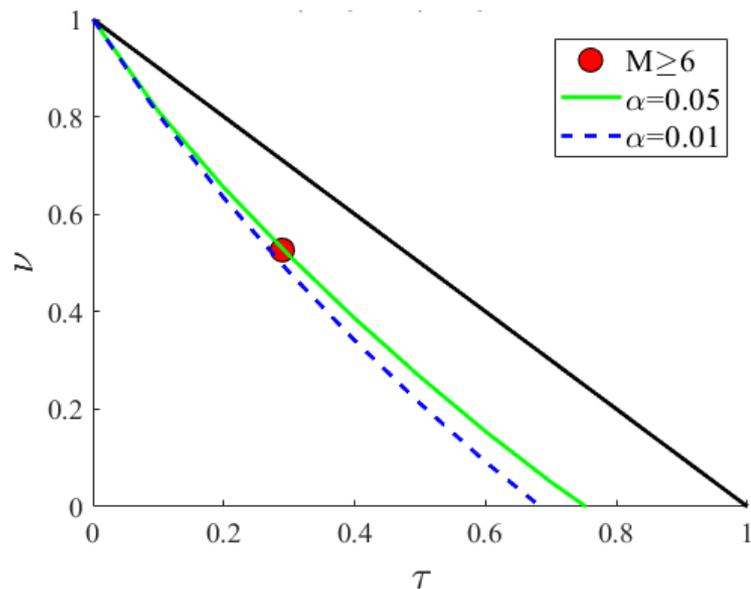


Рис. 6. Диаграмма ошибок для методики прогноза по возмущениям  $foF2$  опорной станции РК553 для землетрясений с магнитудами  $M \geq 6.0$ .

## 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!**