

Двадцать третья международная конференция

"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

**Анализ динамики ионосферных параметров в период сильной
сейсмической активности в Камчатском регионе**

(27.07.2025-31.07.2025 гг.)

А.В. ПАВЛОВ

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

2025 год

Введение

29 июля 2025 г. в 23:24:50 UTC в сейсмофокальной зоне южной Камчатки (52.36° с.ш., 160.53° в.д., глубина 43.7 км) произошло сильнейшее землетрясение с $M_w=8.8$ ($M_c=8.4$, $M_L=7.5$), ощущавшееся на большей части территории Камчатского края. Данное землетрясение сопровождалось сильной афтершоковой активностью: по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН в последующие двое суток было зарегистрировано 15 сейсмических событий с магнитудой $M_L \geq 6.0$.

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.

С целью исследования изменений в ионосфере, связанных с процессами подготовки данного землетрясения, был проведён анализ данных, полученных на станции вертикального радиозондирования ионосферы, расположенной в с. Паратунка (Камчатский край) за период с 27 по 31 июля 2025 г. В частности, был проведён анализ особенности следа обыкновенной волны на ионограммах, анализ частотных и высотных параметров областей E и F , изменения коэффициента полупрозрачности спорадического слоя E_s , изменения коэффициента корреляции критической частоты f_oF2 по данным опорной и контрольной ионосферной станций.

По данным ФГБУ ИПГ (<http://ipg.geospace.ru/>) в течение 27.07.2025-31.07.2025 гг. интегральная солнечная активность оценивалась как умеренная в течение всего периода. Число Вольфа изменялось в пределах от 85 до 138, поток радиоизлучения на длине волны $\lambda=10.7$ см находился в пределах от 142 до 157 p.f.u. ($10^{-22} \cdot \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$). Вспышечная солнечная активность: низкая в течение всего периода. По данным среднеширотных станций геомагнитное поле: спокойное с отдельными периодами неустойчивости 25, 26 и 29 июля; очень спокойное 27, 28 июля; от спокойного до слабо возмущенного 30, 31 июля.

Ионосферные возмущения, наблюдаемые в Камчатском регионе в периоды повышения сейсмической активности

При исследовании динамики ионосферных параметров в Камчатском регионе, отмечались следующие особенности, появляющиеся от нескольких часов до нескольких суток до наступления землетрясений [1–3]:

высыпание заряженных частиц из радиационных поясов в ионосферу (образование K -слоя);

- формирование диффузионного спорадического слоя E_s (E_s -spread);
- экранирование области F нижележащим спорадическим слоем E_s ;
- формирование спорадического слоя E_s типа r ;
- повышение значений критической частоты $foF2$, превышающее медианные значения на фоне развития магнитной бури (при обычном развитии магнитосферной бури в ионосфере за счет вихревого электрического поля возникает дрейф, который приводит к смещению электронов на большие высоты и к уменьшению их концентрации).
- формирование диффузионного слоя в области F (F -spread);
- расслоение следа на ионограммах в области $F2$ по частоте и высоте;
- разветвление следа на ионограммах вблизи критической частоты $foF2$.
- прерывистый след (явление лакуны), сильный наклон слоя (ненормальный ход следа вблизи $foF2$).

В таблице 1 представлены результаты обработки ионограмм за период 27.07.2025–31.07.2025 гг.

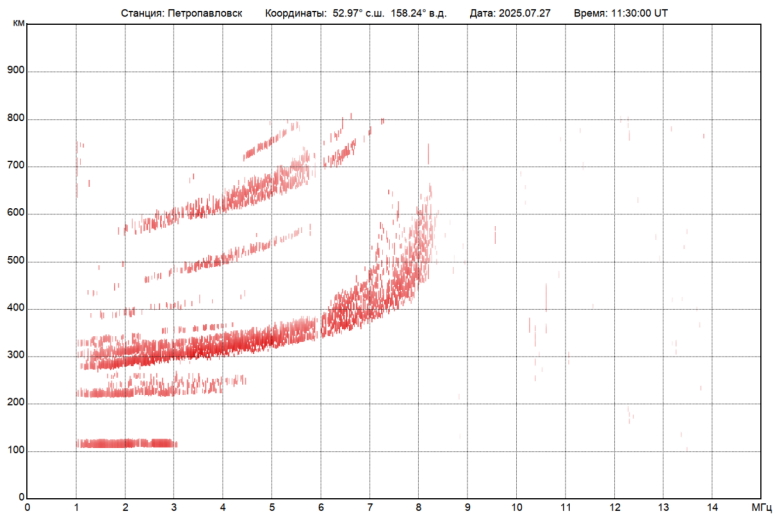
Таблица 1. Результаты обработки ионограмм за период 27.07.2025–31.07.2025 гг.

Время (UT)	27.07.2025	28.07.2025	29.07.2025	30.07.2025	31.07.2025
К-слой					
Es типа r	11:00	12:45-13:00		11:45;13:00	13:00-14:00;16:00-16:15
Es-spread	15:30-16:00	08:30;10:00-11:00; 16:00-16:15;17:45-18:30	14:15;14:30	14:00-14:30	03:30-04:30
Экранирование слоя F2		00:15			01:15;01:30;02:00
Расслоение следа на в слое F2 по частоте и высоте	01:30	00:30;01:30;02:15; 03:15;21:45;22:30			21:00
Разветвление следа вблизи foF2	00:45;01:15; 17:15; 19:00; 21:00	03:30;18:15;18:30; 20:00;20:30		20:00;21:00	19:00-20:00; 20:30;20:45;21:15
Ненормальный. ход следа вблизи F2	22:30	04:15;19:00; 19:15;19:30	23:45		
F-spread	10:00-14:00;17:00			11:00-15:00	11:00-18:00

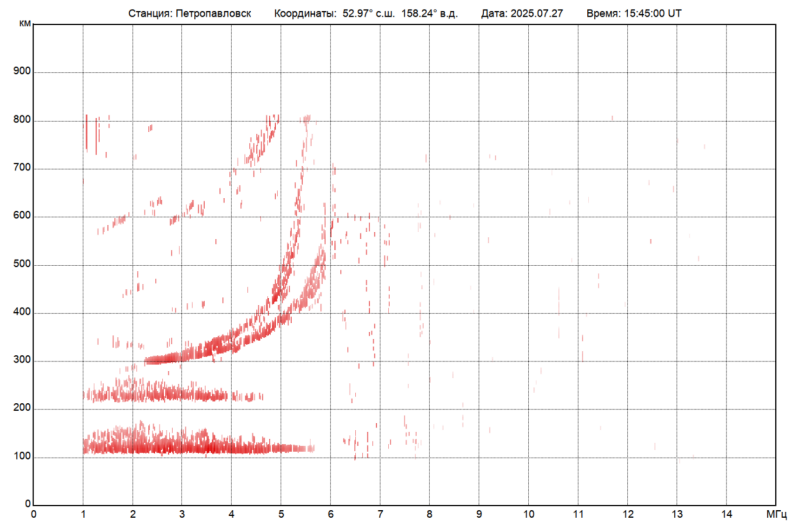
По результатам обработки ионограмм были выявлены следующие особенности: 27.07.2025–28.07.2025 гг., и 30.07.2025–31.07.2025 гг. формирование спорадического слоя *Es* типа *r*; 27.07.2025–31.07.2025 гг. формирование диффузионного спорадического слоя *Es* (*Es-spread*); 28.07.2025 г. и 31.07.2025 г. экранирование слоя *F2*; 27.07.2025–28.07.2025 гг. и 31.07.2025 г.; расслоение следа на в слое *F2* по частоте и высоте; 27.07.2025 г. и 30.07.2025-31.07.2025 гг. формирование диффузионного слоя *F* (*F-spread*); 27.07.2025–28.07.2025 гг. и 30.07.2025–31.07.2025 гг. появление разветвленного следа вблизи критической частоты *foF2*.

Прогностической эффективности J_M комплекса рассматриваемых аномалий по методике А.А. Гусева для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ принимает значения в диапазоне от 1.4 до 2.5 в зависимости от сочетания прогностических признаков, используемых в методике прогноза [3].

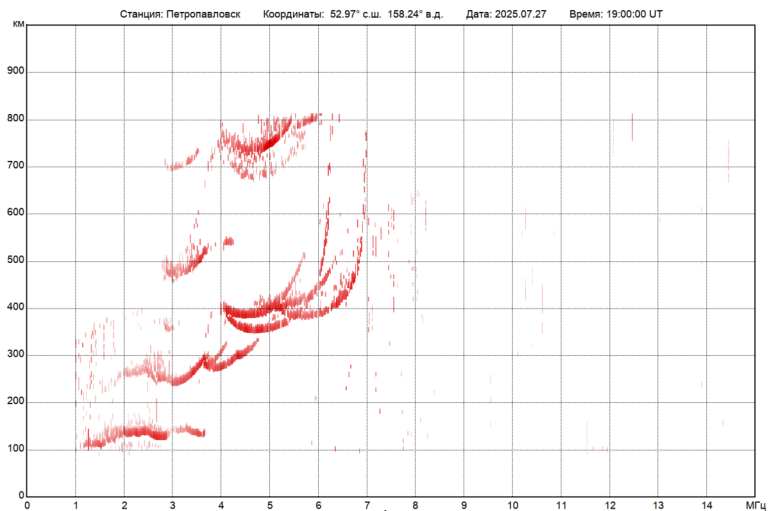
На рисунке 1 представлены примеры ионограмм с аномалиями, зарегистрированных за несколько суток до наступления землетрясения с магнитудой $M=8.8$.



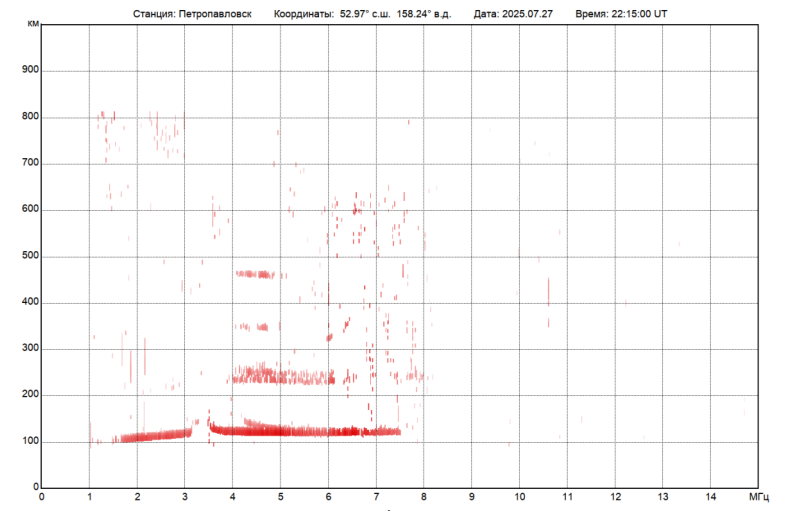
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1. Особенности следа обыкновенной волны на ионограммах, зарегистрированных 27.07.2025 г. (UT): а) Диффузионный слой F_2 (F -spread) в 11:30; б) Диффузионный спорадический слой (E_s -spread) в 15:45 (UT); в) Разветвление следа на вблизи критической частоты f_oF_2 в 19:00; г) Экранирование F_2 в 22:15 (UT).

Идентификация возможного ионосферного предвестника землетрясений на основе комплекса параметров E и F области ионосферы

В ионосферном слое Es перед наступлением сильных землетрясений могут наблюдаться существенные изменения: увеличение частоты его появления, рост предельной частоты отражения и частоты экранирования, появление диффузных отражений. Кроме изменения частотных параметров слоя Es могут наблюдаться значимые изменения его действующих высот в период подготовки землетрясений. Высоко расположенные спорадические слои нередко сопровождаются отклонением значений частотных параметров слоев Es и $F2$ от своих фоновых значений в течение одного и того же суточного интервала наблюдений. Таким образом, указанные особенности в изменениях параметров ионосферных слоев можно отнести к предполагаемым предвестникам готовящихся землетрясений.

В качестве возможных прогностических признаков могут рассматриваться аномальные временные вариации следующих ионосферных параметров: $h'Es$ – наименьшая действующая высота спорадического Es -слоя для обыкновенной волны; $foEs$ – предельная частота обыкновенной волны спорадического Es -слоя ионосферы; $fbEs$ – экранирующая частота обыкновенной волны спорадического Es -слоя ионосферы; $foF2$ – критическая частота обыкновенной волны $F2$ -слоя ионосферы; hF – минимальная действующая высота следа отражений обыкновенной волны для области F ионосферы; $hmF2$ – высота максимума электронной концентрации $F2$ -слоя ионосферы.

Методика идентификации возможного ионосферного предвестника землетрясений с $M \geq 5.0$ на основе комплекса прогностических параметров, была построена по следующей схеме:

- 1) Для каждого момента времени суток каждого ионосферного параметра $X(t_i)$ на предшествующем интервале длительностью $T_{\text{med}}=30$ суток вычислялась медиана $X_{\text{med}}(t_i)$. При этом в качестве фона выбирались магнито-спокойные дни и вычисление медианы производилось только по суткам, в которых во всех трех часовых интервалах значения геомагнитного индекса составляли $K \leq 2$. Для определения меры отклонения от спокойного фонового распределения использовались параметры межквартильных изменений: $Y_{\pm} = X_{\text{med}}(t_i) \pm 1.5IQR(t_i)$, где $X_{\text{med}}(t_i)$ – медиана, рассчитанная по выбранным магнито-спокойным дням, а $IQR(t_i) = Q_3(t_i) - Q_1(t_i)$ – разность между верхним Q_3 и нижним Q_1 квартилями также рассчитанная по суткам с низкой геомагнитной активностью.
- 2) На исследуемом временном интервале T идентифицировалось время появления аномальных значений параметра $h'Es$, выходящих за верхнюю Y_+ или нижнюю Y_- границы его диапазона фоновых значений, длительностью которых была $\Delta t \geq 1.5$ часа.
- 3) Если в пределах суточного интервала времени $\Delta T = \pm 12$ часов относительно момента появления аномальных значений $h'Es$ наблюдалась низкая геомагнитная активность (все трехчасовые значения индекса $K \leq 2$ и $Dst > -30$ нТл), то определялось наличие в течение времени ΔT отклонений от верхних границ Y_+ диапазона своих фоновых значений у дополнительных ионосферных параметров $foEs, fbEs, foF2, hF, hmF2$.
- 4) Если на суточном интервале времени ΔT наблюдалась низкая геомагнитная активность (все трехчасовые значения индекса $K \leq 2$) и для как минимум трех из пяти дополнительных параметров были выявлены аномальные отклонения их значений от верхней границы Y_+ диапазона фоновых значений, то идентифицированная группа ионосферных параметров рассматривалась как возможный краткосрочный ионосферный предвестник землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$.

Как видно из рисунка 2, аномальные значения параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, $foF2$ и hF , превышающие верхние границы диапазона фоновых значений, наблюдались 27.07.2025 г. и 28.07.2025 г. в условиях низкой геомагнитной активности, примерно за двое суток до наступления землетрясения с магнитудой $M=8.8$. Также превышение верхних границ диапазона фоновых значений всех шести параметров наблюдалось 30.07.2025 г. и 31.07.2025 г., после основного сейсмического события, в условиях сильного афтершокового процесса.

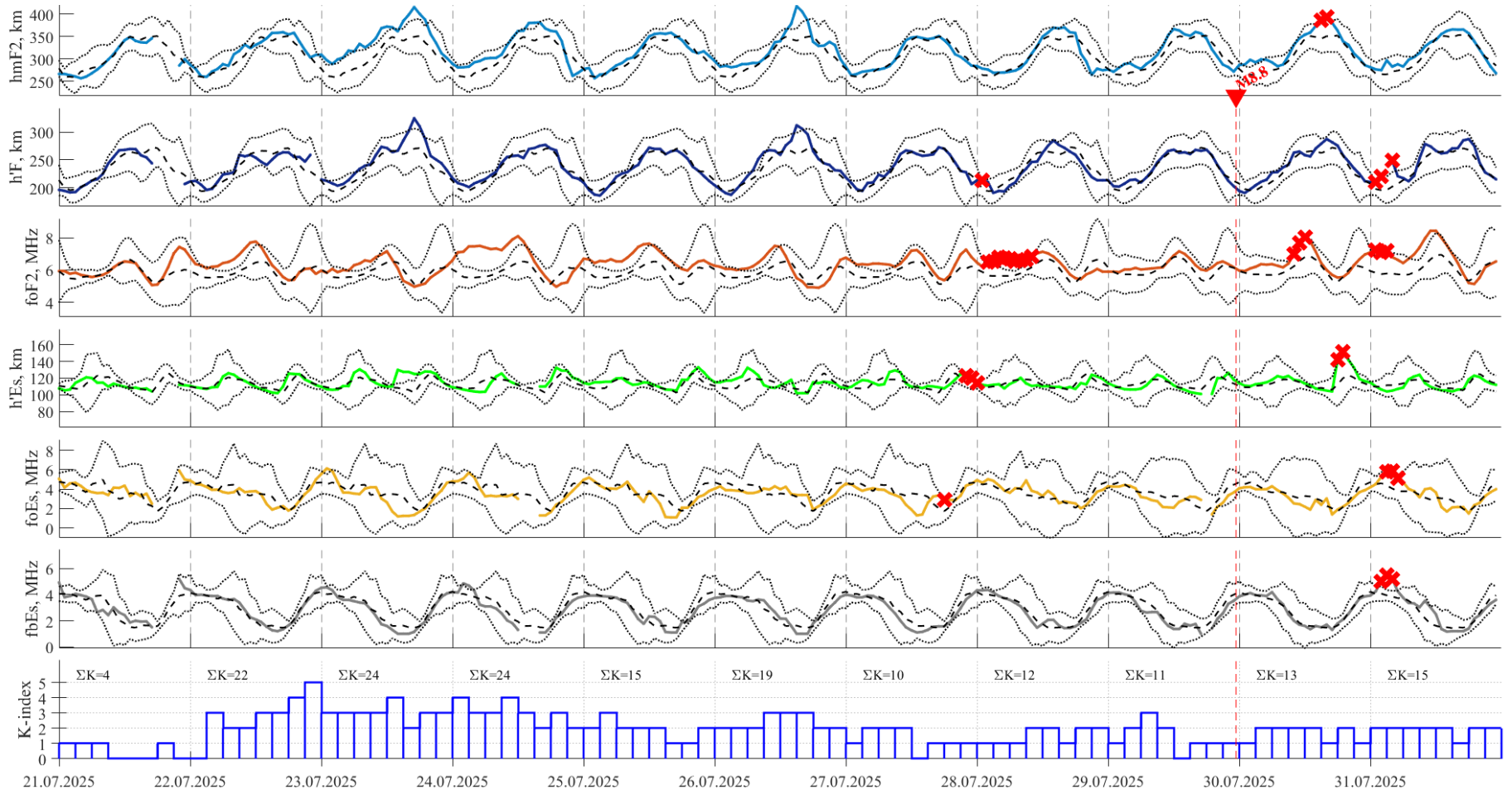


Рисунок 2. Ионосферные параметры $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, $foF2$, hF , $hmF2$, а также их медианные значения (штриховые линии) и границы диапазона фоновых значений (пунктирные линии) за временной интервал 21.07.2025-31.07.2025 гг. Идентифицированные аномалии отмечены красным маркером 'x'. Землетрясение с магнитудой $M=8.8$, произошедшее 29.07.2025 23:24:53 (UT) с координатами эпицентра $\varphi=52.49^\circ$ с.ш. и $\lambda=160.24^\circ$ в.д., глубиной гипоцентра $h=35$ км и эпицентральной расстоянием $r=145$ км до места расположения ионосферной станции, отмечено на временной оси красным треугольником.

Коэффициент полупрозрачности спорадического слоя E_s

Исследования сейсмоионосферных связей показывают, что акустические и электромагнитные возмущения, возникающие в процессе подготовки землетрясений, могут быть существенной причиной турбулизации ионосферы в диапазоне масштабов от десятков метров до десятков километров и характерных времен существования порядка нескольких десятков минут. Одним из ионосферных параметров, характеризующих нерегулярные турбулентные процессы, является коэффициент полупрозрачности спорадического слоя $\Delta fbEs$, аномальное изменение значений которого в период подготовки сильных землетрясений наблюдались в различных сейсмоактивных регионах Земли: увеличение коэффициента полупрозрачности на интервале от 14 до 3 суток до момента землетрясения и последующее резкое уменьшение значений этих параметров за 1 сутки до землетрясения [4–6].

Коэффициент полупрозрачности $\Delta fbEs$ характеризует рассеяние радиоволн на мелкомасштабных (десятки метров) неоднородностях E_s и определяется по формуле:

$$\Delta fbEs = (foEs - fbEs) / fbEs$$

где $foEs$, $fbEs$ - соответственно предельная частота и частота экранирования спорадического слоя E_s . Увеличение значений коэффициента полупрозрачности $\Delta fbEs$ свидетельствует об образовании неоднородностей спорадических слоев. Увеличение степени неоднородности свидетельствует о возникновении турбулентности в спорадическом слое E_s .

Как видно из рисунка 3, возрастание коэффициента полупрозрачности спорадического слоя $\Delta fbEs$, превышающее интервал трёх стандартных отклонений, наблюдалось 28.05.2025 г. и 29.05.2025 г. до наступления землетрясения с $M=8.8$. Геомагнитная активность в течение этих суток была достаточно низкая, суммарные суточные значения K -индексов были равны соответственно $\Sigma K=12$ и $\Sigma K=11$.

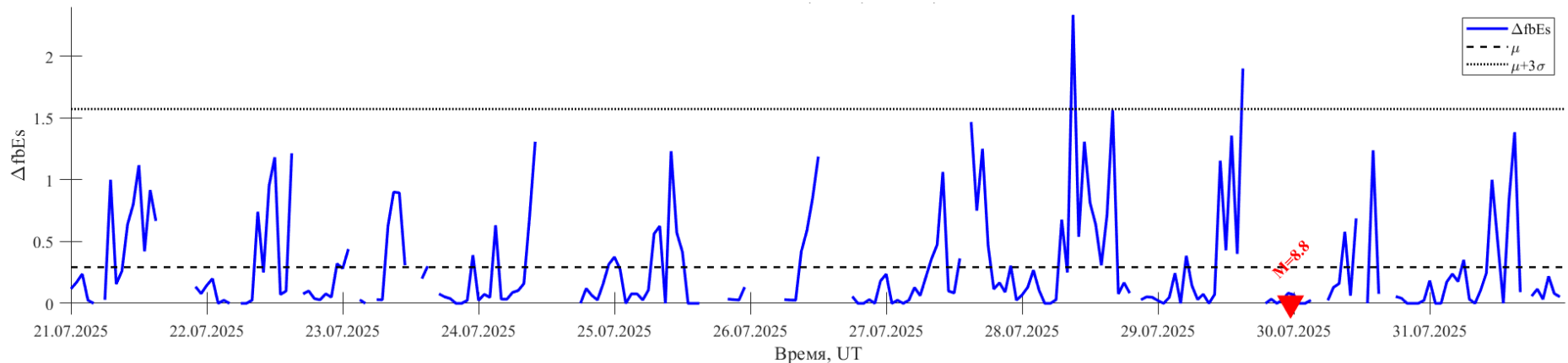


Рисунок 3. Коэффициент полупрозрачности спорадического слоя $\Delta fbEs$ за временной интервал 21.07.2025–31.07.2025 гг. Землетрясение с магнитудой $M=8.8$, произошедшее 29.07.2025 23:24:53 (UT) отмечено на временной оси красным треугольником.

Идентификация возможного ионосферного предвестника землетрясений на основе корреляционного анализа

Одной из важнейших характеристик ионосферных предвестников землетрясений является их локальный характер [7]. Размер измененной области в ионосфере имеет тот же порядок, что и размер области подготовки землетрясения на поверхности земли [8; 9]. На основе этого факта был предложен метод обнаружения ионосферных вариаций, связанных с процессом подготовки землетрясения [9]. Эта методика была использована в данной работе для идентификации ионосферного предвестника при подготовке сильных землетрясений в Камчатском регионе.

Изменчивость ионосферы с точки зрения вариаций критической частоты f_oF2 ниже для вариаций, связанных с сейсмической активностью, чем для вариаций, связанных с геомагнитными бурями. Следовательно, сейсмически генерируемые вариации могут быть затенены вариациями во время геомагнитной бури. Однако в случае, если измерения проводятся в двух точках, вариации критической частоты f_oF2 , вызванные геомагнитными возмущениями, могут быть исключены путем взаимной корреляции записей в данных точках, поскольку вариации f_oF2 будут практически идентичными для обеих станций. В большом диапазоне широт и долгот реакция ионосферы на геомагнитные возмущения очень похожа, и это может обеспечить высокую корреляцию суточных колебаний для разных ионосферных станций. При этом «приемник-датчик» будет намного более чувствителен к сейсмогенным изменениям по сравнению с «контрольным приемником».

Расчет коэффициента корреляции проводился на основе часовых значений f_oF2 , полученных на станциях вертикального радиозондирования ионосферы, по формуле:

$$C_{f_oF2} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{1,i} - \bar{f}_1)(f_{2,i} - \bar{f}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{1,i} - \bar{f}_1)^2 \sum_{i=1}^n (f_{2,i} - \bar{f}_2)^2}}$$

$$\text{где } \bar{f}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n f_{1,i}}{n}, \quad \bar{f}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_{2,i}}{n}, \quad n=24$$

Опорная ионосферная станция: РК553 (52.97° с.ш., 158.24° в.д., Камчатский край);

Контрольной ионосферная станция: МА560 (60.09° с.ш., 150.93° в.д., Магаданская область)

Как видно из рисунка 4, уменьшения значений коэффициента корреляции C_{foF2} началось примерно за двое суток до наступления землетрясения с $M=8.8$, когда 27.05.20025 г. C_{foF2} достигло значений ниже 0.5. Примерно за сутки до наступления сейсмического события, значение C_{foF2} достигло минимального значения за рассматриваемый временной интервал и составило $C_{foF2}=0.12$.

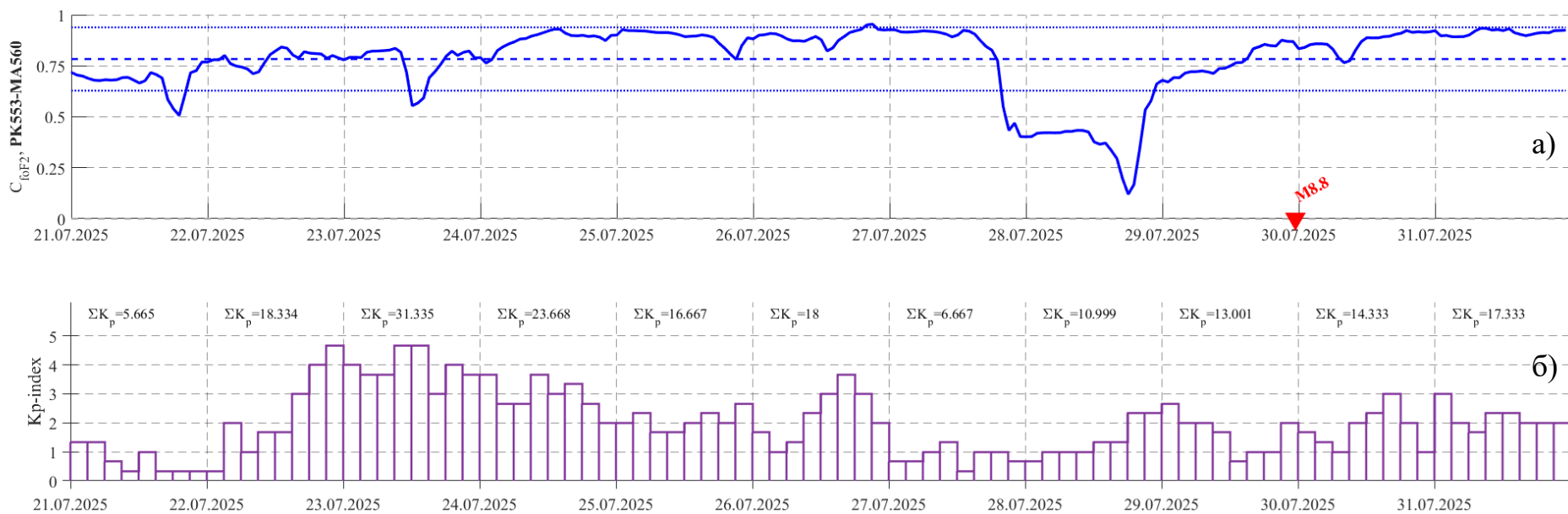


Рисунок 4. а) Коэффициент корреляции критической частоты $foF2$, вычисленный по данным ионосферных станций PK553 и MA560, за временной интервал 21.07.2025-31.07.2025 гг.; б) Значения геомагнитного индекса Kp . Землетрясение с магнитудой $M=8.8$, произошедшее 29.07.2025 23:24:53 (UT) отмечено на временной оси красным треугольником.

Заключение

Анализ данных, полученных на станции вертикального радиозондирования ионосферы (с. Паратунка, Камчатский край) за период с 27 по 31 июля 2025 г., показал:

- По результатам обработки ионограмм получено, что в течение двух суток до наступления землетрясения с магнитудой $M=8.8$, так и в последующие сутки с сильной афтершоковой активности, на фоне низкой геомагнитной активности с были выявлены следующие особенности: 27.07.2025–28.07.2025 гг. и 30.07.2025–31.07.2025 гг. формирование спорадического слоя E_s типа r ; 27.07.2025–31.07.2025 гг. формирование диффузионного спорадического слоя E_s (E_s -spread); 28.07.2025 г. и 31.07.2025 г. экранирование слоя F_2 ; 27.07.2025–28.07.2025 гг. и 31.07.2025 г. расслоение следа на в слое F_2 по частоте и высоте; 27.07.2025 г. и 30.07.2025–31.07.2025 гг. формирование диффузионного слоя F (F -spread); 27.07.2025–28.07.2025 гг. и 30.07.2025–31.07.2025 гг. появление разветвленного следа вблизи критической частоты foF_2 .
- Возрастание коэффициента полупрозрачности ΔfbE_s , превышающее интервал трёх стандартных отклонений, наблюдалось 28.05.20025 г. и 29.05.2025 г. Также, до наступления землетрясения, было выявлено превышение значений ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , hF и foF_2 верхних границ своих диапазонов фоновых значений в течение 27.07.2025–28.07.2025 гг. в условиях умеренной геомагнитной активности, а в период афтершоковой активности 29.07.2025–31.07.2025 гг. такие отклонения были зафиксированы для всех шести ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , foF_2 , hF и hmF_2 .
- Расчёт коэффициента корреляции C_{foF_2} критической частоты foF_2 , вычисленного по данным опорной ионосферной станции РК553 (52.97° с.ш., 158.24° в.д., Камчатский край) и контрольной ионосферной станции МА560 (60.09° с.ш., 150.93° в.д., Магаданская область) показал, что за двое суток до землетрясения, произошедшего 29 июля 2025 г. началось уменьшение значений коэффициента корреляции, достигшего 28.07.2025 г., примерно за сутки до наступления сейсмического события, минимального значения $C_{foF_2}=0.12$.

Как отмечалось ранее в работах [1–3, 10–13], подобные ионосферные аномалии наблюдались ранее и перед другими сильными сейсмическими событиями, происходившими на Камчатке, и могут рассматриваться как возможные ионосферные предвестники землетрясений в Камчатском регионе.

Литература

1. Bogdanov V.V., Kaisin A.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., Meister C.V.. Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2017. V. 98. pp. 154-160. DOI:10.1016/j.pce.2016.04.002.
2. Богданов В.В., Павлов А.В. Динамика поведения ионосферных параметров накануне землетрясений в периоды 28.02.-01.03.2013 г. и 19.05-24.05.2013 г. // *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2018. № 2(22). С. 85-99. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99
3. Богданов В.В. Павлов А.В. Оценка эффективности прогноза землетрясений в Камчатском регионе по комплексу ионосферных аномалий // *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2022. Т. 41. № 4. С. 167-177. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-167-177.
4. Liperovskaya, E.V., Pokhotelov O.A., Hobara Y., Parrot M. Variability of sporadic E-layer semi transparency (foEs - fbEs) with magnitude and distance from earthquake epicenters to vertical sounding stations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2003. Vol. 3. pp. 279-284.
5. Liperovsky, V.A. Pokhotelov O.A., Liperovskaya E.V., Parrot M., Meister C.-V., Alimov O.A. Modification of sporadic E-Layers caused by seismic activity // *Surveys in geophysics*. 2000. Vol. 21. pp. 449-486.
6. Liperovskaya, E.V., Meister C.-V., Pokhotelov O.A., Parrot M., Bogdanov V.V., Vasil'eva N.E. On Es-spread effects in the ionosphere connected to earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2006. Vol. 6. pp. 741-744.
7. Pulnits S.A., Legen'ka A.D. Spatial-temporal characteristics of the large scale disturbances of electron concentration observed in the F-region of the ionosphere before strong earthquakes // *Cosm. Res.*, 2003. Vol. 41, pp. 221-229.
8. Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pure and applied geophysics*. 1979. Vol. 117, pp. 1025-1044.
9. Pulnits, S.A. Gaivoronska T.B., Leyva Contreras A., Ciraolo L. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2004. Vol. 4. pp. 697-702.
10. Богданов В.В., Павлов А.В. Исследование влияния сейсмической активности на коэффициент полупрозрачности спорадического слоя Es над Камчаткой // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2020. Т. 33. № 4. С. 157-165. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-157-165.
11. Богданов В.В., Павлов А.В. Идентификация ионосферных предвестников землетрясений в Камчатском регионе на основе корреляционного анализа // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2021. Т. 37. № 4. С. 150-158. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-150-158.
12. Bogdanov, V., Pavlov, A. Disturbances in the E and F regions of the ionosphere preceding earthquakes in the Kamchatka region. In: Dmitriev, A., Lichtenberger, J., Mandrikova, O., Nahayo, E. (eds) *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham.2023. pp. 245-254. DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_25.
13. Павлов А.В. Оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2024. Т. 49. № 4. С. 203-219. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-203-219.