


ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-67-80>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 551.510.535



Возмущения в слое F2 ионосферы, предшествующие наступлению землетрясений с $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе

*В. В. Богданов, А. В. Павлов**

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мира, 7, Россия

Аннотация. В работе представлен анализ данных ежечасных измерений критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF_2), произведенных за временной интервал 01.07.1968–30.06.1997 гг. на станции вертикального радиозондирования ионосферы РК553 (с. Паратунка, Камчатский край) с целью идентификации сейсмоионосферных аномалий, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$. В ходе анализа было рассмотрено 45 землетрясений соответствующих магнитуд, в зоне подготовки которых, определяемой по формуле Добровольского, находилась ионосферная станция РК553. В качестве контрольной станции была выбрана станция вертикального радиозондирования ионосферы MG560 (п. Стекольный, Магаданская область). Процедура обнаружения сейсмоионосферных возмущений заключалась в совместном анализе данных критической частоты f_oF_2 , измеренных на опорной и контрольной ионосферных станциях вертикального радиозондирования ионосферы. Ионосферное возмущение, зарегистрированное на опорной станции, рассматривалось как возможный ионосферный предвестник землетрясений, если отклонение значений f_oF_2 опорной станции от границ фонового диапазона значений наблюдалось в условиях низкой геомагнитной активности, при этом значения f_oF_2 контрольной станции находились в пределах своего диапазона фоновых значений. Аномалии значений f_oF_2 опорной станции предшествовали 20% рассматриваемых сейсмических событий. Произведены оценки количественных характеристик ионосферных возмущений: максимумы относительных отклонений аномальных значений f_oF_2 от медианных значений и от границ фонового диапазона, время упреждения ионосферным возмущением момента землетрясения. Получены эмпирические зависимости, связывающие эпицентральные расстояния землетрясений и время упреждения ионосферных возмущений момента наступления землетрясений с их магнитудой. Выделенные возмущения критической частоты f_oF_2 , могут быть связаны с процессами подготовки соответствующих землетрясений, т.е. могут являться возможными ионосферными предвестниками землетрясений.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное радиозондирование, литосфера, землетрясение, предвестник землетрясений.

Получение: 02.11.2023; Исправление: 11.12.2023; Принятие: 13.12.2023; Публикация онлайн: 14.12.2023

Для цитирования. Богданов В. В., Павлов А. В. Возмущения в слое F2 ионосферы, предшествующие наступлению землетрясений с $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2023. Т. 45. № 4. С. 67-80. EDN: TQCCNS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-67-80>.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания № АААА-А21-121011290003-0. Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Конкурирующие интересы. Конфликт интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: pavlov@ikir.ru


Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Богданов В. В., Павлов А. В., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)

PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-67-80>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86A10, 86A15



Disturbances in the F2 Layer of the Ionosphere Preceding the Onset of Earthquakes with $M \geq 6.0$ in the Kamchatka Region

*V. V. Bogdanov, A. V. Pavlov**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of data from hourly measurements of the critical frequency of the ionospheric F2 layer (foF2), carried out over the time interval 01.07.1968-30.07.1997 at the vertical radio sounding station of the ionosphere PK553 (Paratunka, Kamchatka region) in order to identify seismoionospheric anomalies preceding earthquakes with magnitudes $M \geq 6.0$. During the analysis, 45 earthquakes of corresponding magnitudes were considered, in the preparation zone of which, determined by the Dobrovolsky formula, the PK553 ionospheric station was located. The vertical radio sounding station of the ionosphere MG560 (Stekolny, Magadan region) was chosen as a control station. The procedure for detecting seismic-ionospheric disturbances consisted of a joint analysis of the foF2 critical frequency data measured at the reference and control ionospheric stations for vertical radio sounding of the ionosphere. An ionospheric disturbance recorded at a reference station was considered as a possible ionospheric precursor of earthquakes if the deviation of the reference station's foF2 values from the boundaries of the background range of values was observed under conditions of low geomagnetic activity, while the foF2 values of the control station were within its range of background values. Anomalies in foF2 values of the reference station preceded 20% of the considered seismic events. The quantitative characteristics of ionospheric disturbances were made: the maximum relative deviations of the anomalous foF2 values from the median values and from the boundaries of the background range, the lead time of the ionospheric disturbance at the moment of the earthquake. Empirical dependencies were obtained that connect the epicentral distances of earthquakes and the lead time of ionospheric disturbances at the moment of the onset of earthquakes with their magnitude. The identified disturbances of the critical frequency foF2 may be associated with the processes of preparation of the corresponding earthquakes, i.e. may be possible ionospheric precursors of earthquakes.

Key words: ionosphere, vertical radio sounding, lithosphere, earthquake, earthquake precursor.

Received: 02.11.2023; Revised: 11.12.2023; Accepted: 13.12.2023; First online: 14.12.2023

For citation. Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Disturbances in the F2 layer of the ionosphere preceding the onset of earthquakes with $M \geq 6.0$ in the Kamchatka region. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, 45: 4, 67-80. EDN: TQCCNS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-67-80>.

Funding. The research was carried out in the framework of realization of the State Task AAAA-A21-121011290003-0. The work was realized by the means of the Common Use Center "NorthEastern Heliogeophysical Center" CKP 558279, USU 351757.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: pavlov@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)



Введение

Исследование аномального поведения геофизических параметров, в частности, в таких геосферных оболочках, как атмосфера и ионосфера, регистрируемых в сейсмоактивных районах, может быть полезно при поиске предвестников сильных землетрясений. Эффекты в ионосфере могут проявляться как до наступления сейсмических событий, так и после них. Возможные физические механизмы связи возмущений в ионосфере, предшествующих наступлению землетрясений подробно рассматривались в работах [1–3]. 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.

Одним из часто рассматриваемых параметров ионосферы при поиске предвестников землетрясений является критическая частота f_oF2 слоя F2, непосредственно связанная с концентрацией электронов на высоте главного максимума ионосферы. Так, в работах [4–7] по данным критической частоты f_oF2 ионосферных станций, находящихся в зоне подготовки землетрясения, на фоне спокойной магнитосферы были обнаружены ионосферные возмущения, предшествовавшие наступлению ряда землетрясений. При этом на удаленных от эпицентров землетрясений контрольных станциях возмущения за аналогичный период наблюдения не наблюдались. Эти возмущения авторы интерпретировали как возможные ионосферным предвестники землетрясений.

Целью данной работы является поиск возмущений в ионосфере, предшествующих наступлению землетрясений, и определение их количественных характеристик в условиях низкой геомагнитной активности для ряда землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе по данным опорной ионосферной станции 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 MAGADAN (MG560, географические координаты $\varphi = 60.09^\circ$ с.ш., $\lambda = 150.93^\circ$ в.д.).

Методика исследования

Анализ вариаций значений критической частоты f_oF2 проводился на основе подхода, близкому к тому, что представлен в работах [6, 7]. Процедура обработки данных состояла в следующем. Для каждого землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$ и глубиной гипоцентра $h \leq 100$ км, произошедшего за рассматриваемый интервал времени $T=01.07.1968-31.06.1997$ гг., по формуле Добровольского $R_D = 10^{0.43M}$ [8] определялся радиус зоны его подготовки на поверхности Земли, а также рассчитывалось расстояние R_{Σ} от эпицентра землетрясения до наземной станции вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) PETROPAVLOVSK. В

случае, если оказывалось, что $R_{\text{Э}} \leq R_{\text{D}}$, то эти сейсмические события отбирались для дальнейшего анализа. Таким образом, всего было отобрано $N_{\text{ЭТ}} = 45$ землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, удовлетворяющих этому условию.

На основе статистического анализа данных спутника «DEMETER», который был специально предназначен для исследования эффектов в ионосфере, предшествующих землетрясениям, в работе [9] было установлено, что электромагнитные предвестники начинают появляться примерно за две недели до сейсмического события, при этом максимальный эффект приходится на последние 7 суток перед землетрясением. Таким образом, для обнаружения аномалий, данные критической частоты foF2 опорной и контрольных станций анализировались для каждого землетрясения на временном интервале $T_{\text{ан}}$ от -14 до 0 дня, где день землетрясения являлся нулевым.

При идентификации возможных сейсмоионосферных эффектов необходим корректный учет уровня геомагнитной активности. Ионосферные эффекты, наблюдаемые перед землетрясениями, невелики, при этом сама ионосфера чрезвычайно изменчива вследствие влияния различных гелиогеофизических факторов, особенно, магнитных бурь. В работе [10] была предложена следующая классификация интенсивности магнитных бурь по величине наименьшего значения Dst-индекса в период бури (Dst_{min}): I – для слабых геомагнитных бурь (СлГБ) $Dst_{\text{min}} \in [-50; -30]$ нТл; II – для умеренных геомагнитных бурь (УГБ) $Dst_{\text{min}} \in [-100; -50]$ нТл; III – для сильных геомагнитных бурь (СГБ) $Dst_{\text{min}} \in [-200; -100]$ нТл; IV – для очень сильных геомагнитных бурь (ОСГБ) $Dst_{\text{min}} \in [-350; -200]$ нТл; V – для экстремальных геомагнитных бурь (ЭГБ) $Dst_{\text{min}} < -350$ нТл.

Для определения границ $Y_{\pm}(t_i)$ фонового распределения значений foF2(t_i) использовался межквартильный размах $IQR(t_i) = Q_3(t_i) - Q_1(t_i)$

$$Y_{\pm}(t_i) = foF2_{\text{med}}(t_i) \pm 1.5IQR(t_i) \quad (1)$$

где медиана $foF2_{\text{med}}(t_i)$, нижний (первый) $Q_1(t_i)$ и верхний (третий) $Q_3(t_i)$ квартили, которые вычислялись по суткам, в которых трехчасовой планетарный Kp-индекс принимал заданный диапазон значений. В этом случае, значения $Y_{\pm}(t_i)$ ограничивают амплитуду вариаций foF2(t_i), объясняемую случайными отклонениями, с определенной степенью вероятности. Согласно [11], в случае нормального распределения значений $\Delta foF2(t_i) = foF2(t_i) - foF2_{\text{med}}(t_i)$, величина $1.5IQR(t_i)$ будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям, и значения foF2(t_i) под воздействием разных случайных факторов должны появляться в пределах границ Y_{\pm} с вероятностью 95%, а вне этих границ вероятность появления значений foF2(t_i) составит соответственно 5%. При этом, можно отметить, что согласно [12] короткопериодические изменения в поведении foF2, связанные с метеорологическими факторами, такими как распространение вверх планетарных, приливных и атмосферных акустико-гравитационных волн, имеют величину порядка одного стандартного отклонения.

Идентификация ионосферных возмущений по данным опорной НСВЗИ, которые рассматривались как возможный ионосферный предвестник землетрясения, осуществлялась по следующей процедуре:

1. Для каждого рассматриваемого землетрясения с магнитудой ≥ 6.0 рассматривался временной интервал $T_{ан}$, предшествующий его наступлению. Для каждого часа суток интервала $T_{ан}$ на предшествующем ему интервале $T_{мед} = 30$ суток производилось вычисление по формуле (1) диапазона фоновых значений $Y_{\pm}(t_i)$ критической частоты foF2 для опорной и контрольной НСВЗИ. При этом вычисление $Y_{\pm}(t_i)$ проводилось только по тем суткам интервала $T_{мед}$, в которых трехчасовые индексы геомагнитной активности принимали значения $Kp \leq 2_+$.
2. Для обеих станций на интервале $T_{ан}$ 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».
3. 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 трем точкам).
4. Ближайшее к моменту землетрясения ионосферное возмущение Δf_+ или Δf_- (при обратном отсчете по оси времени) 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:
 - трехчасовые индексы $Kp \leq 2_+$ и минимальное значение $Dst_{min} > -30$ нТл;
 - отсутствуют возмущения Δf_+ или Δf_- по данным контрольной станции;
 - отсутствуют пропуски измерений foF2(t_i) на контрольной станции.

Результаты применения методики

На рис. 1 представлены результаты сравнения временных вариаций значений foF2 по мировому времени UT на опорной станции PETROPAVLOVSK (рис. 1а) и контрольной станции MAGADAN (рис. 1б) в течение 15 дней в связи с землетрясением, произошедшим на эпицентральной расстоянии $R_{\text{э}} = 224.38$ км от станции PETROPAVLOVSK 06.06.1978 г. с магнитудой $M = 6.0$. Красная вертикальная штриховая линия с красным треугольником

отмечает момент землетрясения. Медианные значения foF2 (по совокупности отобранных спокойных дней) на обеих панелях даны штриховыми линиями. Пунктирные линии фиксируют полосы разбросов Y_{\pm} , а выходящая за границы полосы часть ионосферного возмущения (т. е. «аномальная» часть в вариациях foF2) показана красным маркером 'x'. На двух нижних панелях рис. 1 приведены временные изменения планетарного Kp-индекса и Dst-индекса соответственно. Из рис. 1а видно, что наблюдаемое 27.08.1978 г. на опорной станции PETROPAVLOVSK возмущение носит «отрицательный» характер, т.е. выходит за нижнюю границу полосы разброса Y_{\pm} . При этом значения геомагнитных индексов в течение ± 12 часов относительно начала появления ионосферного возмущения составляют $Kp \leq 2_{+}$ и $Dst_{\min} > -30$ нТл. На контрольной станции MAGADAN (рис. 1б) все вариации foF2 на этом временном интервале сосредоточены исключительно внутри своей полосы Y_{\pm} .

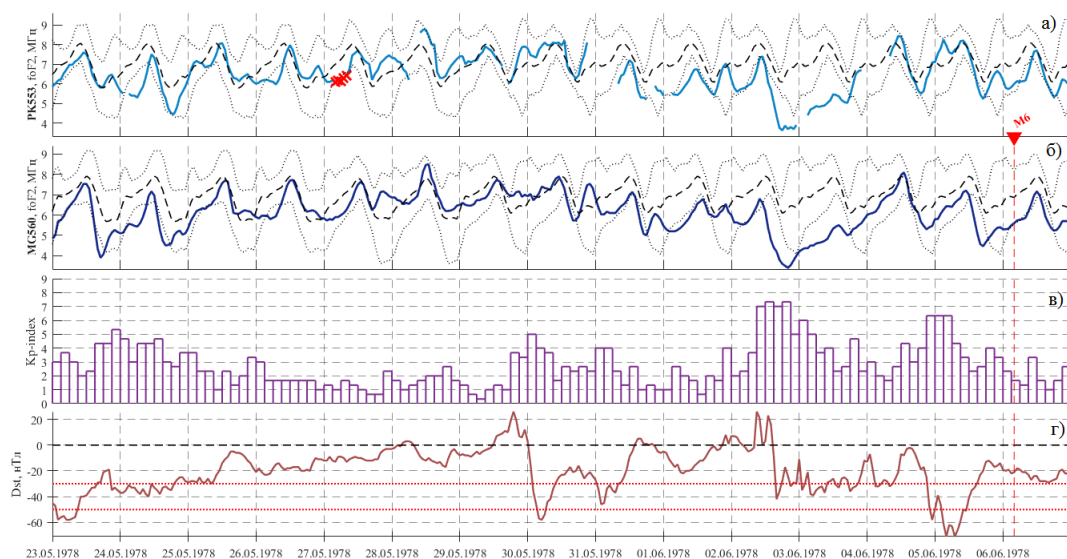


Рис. 1. Временные ряды геофизических параметров (UT) за 23.05.1978–06.06.1978 гг.: foF2, измеренные на опорной НСВЗИ PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной НСВЗИ MAGADAN (б); Kp-индекс (в); Dst-индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 06.06.1978 г. с магнитудой $M = 6.0$. Пунктирными линиями отмечены границы Y_{\pm} , а выходящие за эти границы полосы вариации foF2 (ионосферная аномалия, предшествующая наступлению землетрясения) отмечены красным маркером 'x'.

[Figure 1. Time series of geophysical parameters (UT) for 23.05.1978–06.06.1978: foF2, measured at the reference ionospheric station PETROPAVLOVSK (a) and at the control ionospheric station MAGADAN (b); Kp-index (c); Dst-index (d). The red triangle marks the moment of the earthquake that occurred on 06.06.1978 with a magnitude of $M = 6.0$. The dotted lines mark the boundaries of Y_{\pm} , and the foF2 variation bands (ionospheric anomaly preceding the onset of an earthquake) extending beyond these boundaries are marked with a red marker 'x'.]

На рис. 2 приведен пример другой «отрицательной» ионосферной аномалии, произошедшей 10.08.1983 г. и предшествовавшей наступлению землетрясения 17.08.1983 г. с магнитудой $M = 7.0$, эпицентр которого находился на удалении $R_{\text{Э}} = 365.94$ км от станции PETROPAVLOVSK. В течение 10.08.1983 г. наблюдалась низкая геомагнитная активность с $K_p \leq 2_+$ и вариации foF2 по данным контрольной станции сосредоточены внутри границ своего фонового диапазона Y_{\pm} .

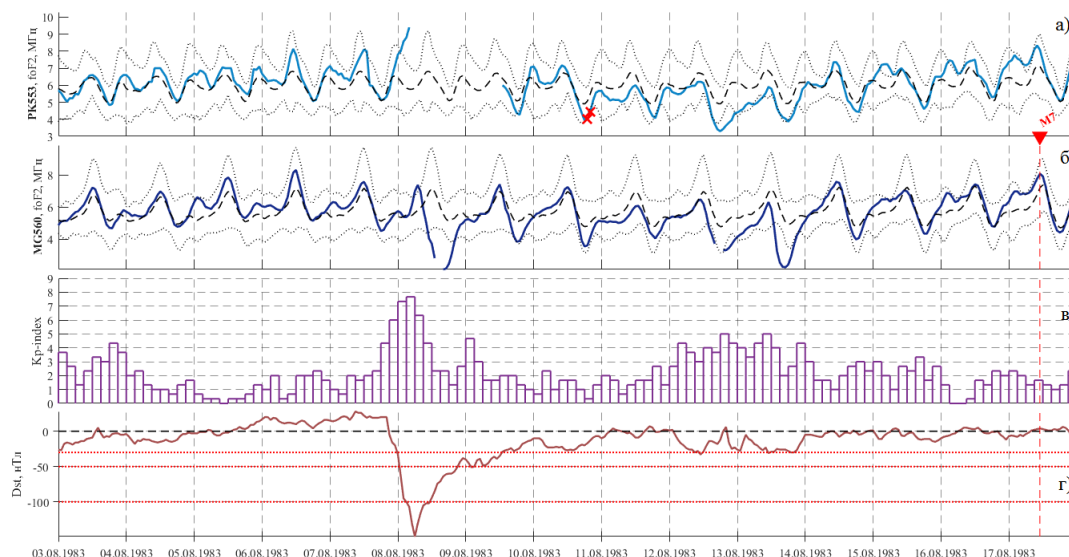


Рис. 2. Временные ряды геофизических параметров (УТ) за 03.08.1983 – 17.08.1983 гг.: foF2, измеренные на опорной НСВЗИ PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной НСВЗИ MAGADAN (б); Kp-индекс (в); Dst-индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 17.08.1983 г. с магнитудой $M = 7.0$. Пунктирными линиями отмечены границы Y_{\pm} , а выходящие за эти границы полосы вариации foF2 (ионосферная аномалия, предшествующая наступлению землетрясения) отмечены красным маркером 'x'.

[Figure 2. Time series of geophysical parameters (UT) for 03.08.1983 – 17.08.1983: foF2, measured at the reference ionospheric station PETROPAVLOVSK (a) and at the control ionospheric station MAGADAN (b); Kp-index (in); Dst-index (g). The red triangle marks the moment of the earthquake that occurred on 01.04.1995 with a magnitude of $M = 7.0$. The dotted lines mark the boundaries of Y_{\pm} , and the foF2 variation bands (ionospheric anomaly preceding the onset of an earthquake) extending beyond these boundaries are marked with a red marker 'x'.]

На рис. 3 приведен пример «положительного» ионосферного возмущения перед землетрясением 01.04.1995 г. с магнитудой $M = 6.0$, эпицентр которого находился на удалении от станции PETROPAVLOVSK $R_{\text{Э}} = 109.94$ км (при $R_{\text{D}} = 380$ км). В данном случае, ионосферная аномалия, предшествующая наступлению землетрясения, наблюдается 25.03.1995 г. только на опорной станции PETROPAVLOVSK, а на контрольной станции MAGADAN какие-либо ионосферные возмущения в течение этого же суточного интервала отсутствуют,

геомагнитный фон в течение 25.03.1995 г. соответствует спокойному состоянию. При этом во время геомагнитной бури 26.03.1995–29.03.1995 гг. с внезапным началом (SC) 06:00 UT 26.03.1995 и $K_p = 6_-$ вариации foF2, выходящие за границы диапазона Y_{\pm} , наблюдались одновременно как на опорной, так и на контрольной станциях.

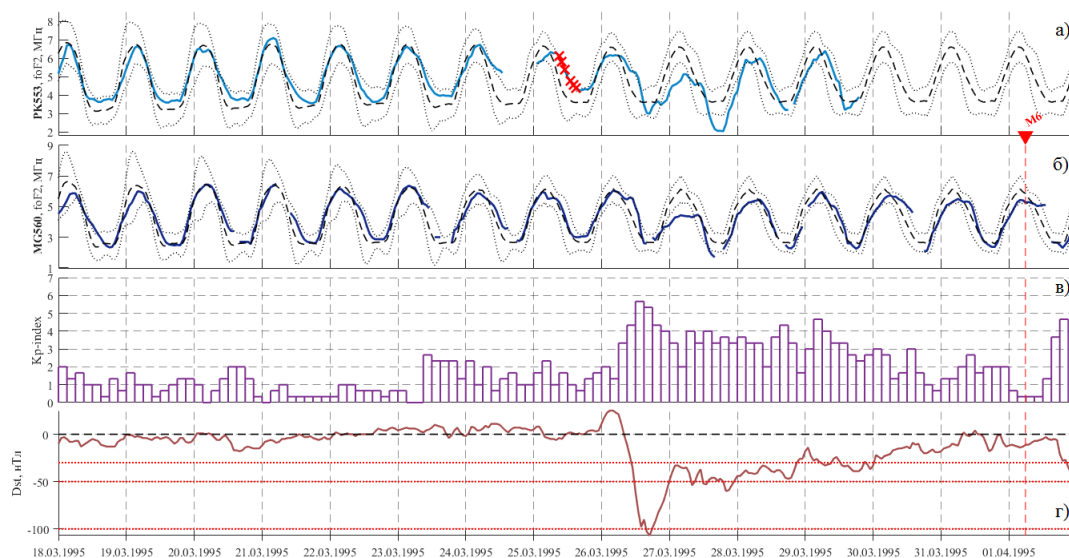


Рис. 3. Временные ряды геофизических параметров (UT) за 18.03.1995–01.04.1995 гг.: foF2, измеренные на опорной НСВЗИ PETROPAVLOVSK (а) и на контрольной НСВЗИ MAGADAN (б); K_p -индекс (в); Dst-индекс (г). Красным треугольником отмечен момент землетрясения, произошедшего 01.04.1995 г. с магнитудой $M = 6.0$. Пунктирными линиями отмечены границы Y_{\pm} , а выходящие за эти границы полосы вариации foF2 (ионосферная аномалия, предшествующая наступлению землетрясения) отмечены красным маркером 'x'.

[Figure 3. Time series of geophysical parameters (UT) for 18.03.1995–01.04.1995: foF2, measured at the reference ionospheric station PETROPAVLOVSK (a) and at the control ionospheric station MAGADAN (б); K_p -index (in); Dst-index (g). The red triangle marks the moment of the earthquake that occurred on 01.04.1995 with a magnitude of $M = 6.0$. The dotted lines mark the boundaries of Y_{\pm} , and the foF2 variation bands (ionospheric anomaly preceding the onset of an earthquake) extending beyond these boundaries are marked with a red marker 'x'.]

Результаты проведенного исследования представлены в таблице, в которой приводятся характеристики выделенных ионосферных возмущений, соотнесенные с указанными землетрясениями. Для землетрясений в данной таблице представлены следующие характеристики: h – глубина гипоцентра землетрясения; R_D – радиус зоны подготовки землетрясения на поверхности земли по оценке Добровольского [8]; $R_{\text{Э}}$ – расстояние от эпицентра землетрясения до НСВЗИ PETROPAVLOVSK. Для выделенных ионосферных возмущений представлены следующие характеристики: ΔT – время упреждения соответствующим

ионосферным возмущением момента землетрясения; относительное отклонение foF2 от медианных значений $\delta f = \text{sign}(foF2(t_i) - foF2_{\text{med}}(t_i)) \max[100 \times (foF2(t_i) - foF2_{\text{med}}(t_i)) / foF2_{\text{med}}(t_i)]$, относительное отклонение foF2 от границ фонового диапазона $\delta Y_{\pm} = \text{sign}(foF2(t_i) - Y_{\pm}(t_i)) \max[100 \times (foF2(t_i) - Y_{\pm}(t_i)) / Y_{\pm}(t_i)]$;

Таблица

Характеристики ионосферных возмущений, соотнесенные с землетрясениями с магнитудой $M \geq 6.0$
[Characteristics of ionospheric disturbances correlated with earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$].

Время ЗТ, UT	φ° , с.ш.	λ° , в.д.	h, км	K_s	M	R_E , км	R_D , км	ΔT , сутки	$\delta f, \%$	$\delta Y, \%$
1969.06.13 08:48:26	49.19	155.7	58	13.9	6.2	456.16	463.45	8.87	15.35	4.44
1973.04.12 13:49:14	50.67	157.78	20	14.2	6.4	257.69	564.94	2.74	14.49	0.56
1973.11.08 08:59:12	49.83	156.57	40	13.8	6.2	367.84	463.45	5.42	-12.02	-2.27
1973.11.11 02:43:06	49.88	156.74	20	13.5	6.0	358.97	380.19	0.2	-22.08	-11.76
1978.06.06 03:58:30	50.96	157.95	21	13.4	6.0	224.38	380.19	10	-12.74	-2.18
1980.11.04 20:26:02	53.73	160.93	22	13.9	6.2	197.52	463.45	7.02	-21.05	-0.41
1983.08.17 10:55:55	55.64	161.53	97	15.4	7.0	365.57	1023.29	6.66	-19.39	-5.42
1993.11.13 01:18:06	51.79	158.83	40	14.6	6.6	137.18	688.65	10.14	-14.02	-1.4
1995.04.01 05:50:21	52.19	159.24	40	13.4	6.0	109.94	380.19	6.87	36.72	5.03

Из таблицы видно, что по данным опорной станции были идентифицированы ионосферные возмущения, предшествующие наступлению девяти землетрясений с $M \geq 6.0$. Из девяти выделенных возмущений три были «положительными» ($\delta Y_{\pm} > 0$), шесть – «отрицательными» ($\delta Y_{\pm} < 0$). Ионосферные возмущения проявлялись с упреждением моментов наступления землетрясения (ΔT) от 0.2 суток до 10.14 суток. Относительные отклонения от медианы δf по совокупности геомагнитно-спокойных дней по абсолютной величине варьируются от 12.2% до 36.72%, при этом относительные превышения уровня Y_{\pm} (δY_{\pm}) составляют от 0.41% до 11.76%. По полученным данным, в среднем, длительность идентифицированных ионосферных возмущений составляет 3.5 часа, максимальная амплитуда, отнесенная к медиане составляет 36.72%, а максимальное превышение границ фоновых значений составляет 11.76%.

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 $\lg[\Delta T] = aM + b$ или $\lg[\Delta T \times R] = aM + b$, где a и b – численные коэффициенты линейной регрессии, полученные методом наименьших квадратов, M – магнитуда землетрясения, ΔT (сутки) и R (км) – время упреждения соответствующим предвестником момента землетрясения и расстояние от эпицентра до станции наблюдения соответственно. Так, в работе [13] показано, что учет расстояния R для одной из выделенных групп предвестников приводит к увеличению соответствующего коэффициента корреляции ρ со значения 0.71 до величины 0.94.

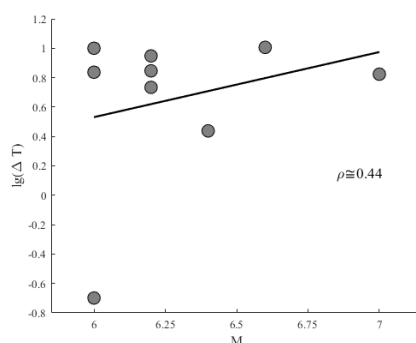


Рис. 4. Линейная регрессия $\lg(\Delta T)$ для идентифицированных ионосферных возмущений, предшествовавших наступлению землетрясений с $M \geq 6.0$, без учета эпицентрального расстояния R .

[Figure 4. Linear regression $\lg(\Delta T)$ for identified ionospheric disturbances preceding the onset of earthquakes with $M \geq 6.0$, without taking into account the epicentral distance R .]

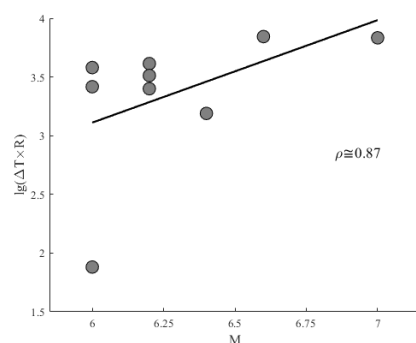


Рис. 5. Линейная регрессия $\lg(\Delta T \times R)$ для идентифицированных ионосферных возмущений, предшествовавших наступлению землетрясений с $M \geq 6.0$, с учетом эпицентрального расстояния R .

[Figure 5. Linear regression $\log(\Delta T \times R)$ for identified ionospheric disturbances that preceded the onset of earthquakes with $M \geq 6.0$, taking into account the epicentral distance R .]

На рис.4, 5 показаны соответствующие линейные регрессии для выделенных ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений.

Как видно из рис. 4 и 5, учет расстояния приводит к увеличению коэффициента корреляции с 0.44 до 0.87. Согласно [7], данный факт можно интерпретировать следующим образом: если выделенные ионосферные возмущения идентифицируются как ионосферные предвестники соответствующих им землетрясений, то такая зависимость свидетельствует о том, что предвестники землетрясений от более удаленных от станции наблюдения эпицентров землетрясений (при одинаковых магнитудах) будут появляться позже. Это означает, что возмущение распространяется от эпицентра к периферии. А в случае отсутствия зависимости от расстояния высокий коэффициент корреляции показывает, что вся зона подготовки землетрясения находится в таком состоянии, что внутри нее в любой точке напряжение среды приблизилось к критическому уровню. В таком случае землетрясение может произойти в любой момент, и поэтому в любом месте зоны подготовки землетрясения могут проявляться разные предвестники этого события с различными, но незначительно отличающимися по длительности интервалами упреждения.

В соответствии с результатами проведенной оценки, представленные ионосферные возмущения могут рассматриваться как краткосрочные ионосферные предвестники землетрясений, так как появлялись только в окрестности станции PETROPVLOVSK на фоне низкой геомагнитной активности.

Заключение

В результате проведенного сравнительного анализа критической частоты за временной интервал 01.07.1968–31.06.1997 гг. в геомагнитно спокойных условиях на ионосферных станциях PETROPVLOVSK (опорная) и MAGADAN (контрольная) были выделены ионосферные возмущения, предшествовавшие наступлению землетрясений с магнитудой с $M \geq 6.0$. Было рассмотрено 45 землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших в окрестности станции PETROPVLOVSK, когда опорная станция входила в зону подготовки соответствующих землетрясений, при этом ионосферные возмущения были обнаружены перед наступлением 20% землетрясений рассматриваемого диапазона магнитуд. При этом время упреждения проявления ионосферных аномалий составляло примерно от 0.2 суток до 10.14 суток до момента наступления сейсмических событий. В среднем, на фоне низкой геомагнитной активности, длительность ионосферных возмущений была 3.5 часа, максимальная амплитуда foF2 относительно медианных значений составляла 36.72%, а максимальное относительное отклонение foF2 от границ фоновых значений составляло 11.76%. Идентифицированные в данной работе ионосферные возмущения могут рассматриваться как возможные ионосферные предвестники землетрясений. 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.

Список литературы


1. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. *Ионосферные предвестники землетрясений*. М.: Наука, 1992. 304 с.
2. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer, 2004. 315 с.
3. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И. *Прогноз землетрясений возможен?!*. М.: Тривант, 2014. 144 с.
4. Хегай В. В., Легенька А. Д., Ким В. П., Георгиева К. Ионосферный предвестник разрушительного землетрясения, произошедшего 6 апреля 2009 г. в Л'Аквиле (Италия), *Геомагнетизм и аэрномия*, 2011. Т. 51, № 1, С. 73-79.
5. Хегай В. В., Легенька А. Д., Ким В. П. Аномальное увеличение критической частоты foF2 перед испанским землетрясением 11.05.2011 г., *Геомагнетизм и аэрномия*, 2014. Т. 54, № 1, С. 89-93.
6. Легенька А. Д., Хегай В. В., Ким В. П. Возмущения критической частоты F2-слоя перед землетрясением в Японии в районе острова Хоккайдо 11.09.2008 г. и в период умеренной магнитной бури по данным станций наземного вертикального зондирования ионосферы, *Геомагнетизм и аэрномия*, 2016. Т. 56, № 3, С. 353-364.
7. Пулинец С. А., Легенька А. Д., Хегай В. В., Ким В. П., Корсунова Л. П. Возмущения ионосферы, предшествующие землетрясениям, по данным наземной станции вертикального зондирования ионосферы WAKKANAI, *Геомагнетизм и аэрномия*, 2018. Т. 58, № 5, С. 713-719.
8. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure Appl. Geophys.*, 1979. vol. 117, no. 5, pp. 154-160.
9. Parrot, M. Statistical analysis of Ionospheric Perturbations Observed by DEMETER in Relation with the Seismic Activity, *Earthquake Science*, 2011. vol. 24, no. 6, pp. 513-521.
10. Loewe C. A., Prölss G. W. Classification and mean behavior of magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 1997. vol. 102, no. 7, pp. 14209-142013.
11. Klotz S., Johnson N. L. *Encyclopedia of Statistical Sciences*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 1983.
12. Forbes J. M., Palo S. E., Zhang X. Variability of the ionosphere, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2000. vol. 62, no. 8, pp. 685-693.
13. Сидорин А. Я. *Предвестники землетрясений*. М.: Наука, 1992. 192 с.

Информация об авторах



Богданов Вадим Васильевич✉ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-9267-0401.




Павлов Алексей Владимирович✉ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-5718-1429.

References


- [1] Liperovskiy V. A., Pokhotelov O. A., Shalimov S. L. Ionosfernye predvestniki zemletryaseniya [Ionospheric precursors of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1992, 304 pp. (In Russian)
- [2] Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin, Springer, 315 p, 2004
- [3] Pulinets S. A., Uzunov D.P., Davidenko D. V., Dudkin S. A., Tsadikovskiy E. I. Prognoz zemletryaseniya vozmozhen?! [Earthquake forecast is possible?!]. Moscow, Trovant, 2014, 144 pp. (In Russian)
- [4] Khegay V. V., Legen'ka A. D., Kim V. P., K. Georgieva K. Ionosfernyy predvestnik razrushitel'nogo zemletryaseniya, proizoshedshego 6 aprelya 2009 g. v L'Akvile (Italiya) [Ionospheric precursor of a destructive earthquake that occurred on April 6, 2009 at L'Aquila (Italy)], Geomagnetizm i aeronomiya, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 73-79 (In Russian)
- [5] Khegay V. V., Legen'ka A. D., Kim V. P. Anomal'noe uvelichenie kriticheskoy chastoty foF2 pered ispanskim zemletryaseniem 11.05.2011 g. [Anomalous increase in the foF2 critical frequency prior to the spanish earthquake of May 11, 2011], Geomagnetizm i aeronomiya, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 89-93 (In Russian)
- [6] Legen'ka A. D., Khegay V. V., Kim V. P. Voymushcheniya kriticheskoy chastoty F2-sloya pered zemletryaseniem v Yaponii v rayone ostrova Khokkaydo 11.09.2008 g. i v period umerennoy magnitnoy buri po dannym stantsiy nazemnogo vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery [Disturbances in the F2 region critical frequency before the earthquake of September 11, 2008 off the coast of Hokkaido, Japan, and during a moderate magnetic storm based on data from ground-based vertical ionosphere sounding stations], Geomagnetizm i aeronomiya, 2016, vol. 56, no. 3, pp. 353-364 (In Russian)
- [7] Pulinets S. A., Legen'ka A. D., Khegay V. V., Kim V. P., Korsunova L.P. Voymushcheniya ionosfery, predshestvuyushchie zemletryaseniyam, po dannym nazemnoy stantsii vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery WAKKANAI, Geomagnetizm i aeronomiya [Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of the vertical ionospheric sounding WAKKANAI], 2018, vol. 58, no. 5, pp. 713-719 (In Russian)
- [8] Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones, Pure Appl. Geophys., 1979, vol. 117. no 5, pp. 1025-1044
- [9] Parrot M. Statistical analysis of Ionospheric Perturbations Observed by DEMETER in Relation with the Seismic Activity, Earthquake Science, 2011, vol. 24, no. 6, pp. 513-521
- [10] Loewe C. A., Prölss G. W. Classification and mean behavior of magnetic storms, J. Geophys. Res., 1997, vol. 102, no 7, pp. 14209-14213
- [11] Klotz, S., Johnson, N.L. Encyclopedia of Statistical Sciences. Hoboken, John Wiley, 1983
- [12] Forbes J. M., Palo S. E., Zhang X. Variability of the ionosphere, J. Atmos. Solar Terr. Phys., 2000, vol. 62, no. 8, pp. 685-693
- [13] Sidorin A. Ya. Predvestniki zemletryaseniya [Earthquakes precursors]. Moscow, Nauka, 192 p., 1992.

Information about authors



Bogdanov Vadim Vasil'evich✉ – Dr. Sci. (Phys. & Math.), Chief Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-9267-0401.



Pavlov Aleksey Vladimirovich✉ – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-5718-1429.