

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.510.535

Научная статья

Идентификация ионосферных предвестников землетрясений в Камчатском регионе на основе корреляционного анализа

В. В. Богданов, А. В. Павлов

Институт космических исследований и распространения радиоволн
ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: vbogd@ikir.ru, pavlov@ikir.ru

Сейсмическая активность является одним из источников изменчивости ионосферы. В данной работе на основе методики [1] исследовано изменение концентрации электронов в ионосфере, предшествующее наступлению сильных землетрясений с $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе. Данная методика основана на вычислении коэффициента корреляции между значениями критической частоты foF2 двух ионосферных станций, одна из которых расположена внутри зоны подготовки землетрясения, а другая – за ее пределами. Рассмотрены данные, полученные на двух станциях PETROPAVLOVSK (PK553) и EARECKSON (EA653) за период 01.09.2018–30.04.2021 гг. Статистический анализ критических частот foF2 показал, что для 6 из 8 землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших на глубинах до 100 км и эпицентральных расстояниях до 500 км от расположения PK553, за 1–12 суток до их наступления предшествовало заметное уменьшение коэффициента корреляции.

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

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-150-158

Поступила в редакцию: 14.10.2021

В окончательном варианте: 10.11.2021

Для цитирования. 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

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2021

Введение

Сейсмическая активность является одним из источников повседневной изменчивости ионосферы [2, 3, 4]. Связь между земной поверхностью и ионосферой происходит из-за аномального электрического поля, генерируемого в зоне подготовки землетрясения [5]. Аномальное электрическое поле, проникающее в ионосферу,

Финансирование. Исследование выполнялось без финансовой поддержки фондов.

вызывает дрейф ионов, что приводит к образованию неоднородностей электронной плотности [6]. Эти аномалии, возникающие в ионосфере до главного сейсмического толчка, можно рассматривать как ионосферные предвестники [3]. Существование ионосферных предвестников землетрясений хорошо установлено не только с помощью физического моделирования, но и статистически [7, 8].

Одной из важнейших характеристик ионосферных предвестников землетрясений является их локальный характер [9]. Размер измененной области в ионосфере имеет тот же порядок, что и размер области подготовки землетрясения на поверхности земли [10, 11]. На основе этого факта в работе [1] был предложен метод обнаружения ионосферных вариаций, связанных с процессом подготовки землетрясения. Эта методика была использована в данной работе для идентификации ионосферных предвестников при подготовке сильных землетрясений в Камчатском регионе.

Методика исследования

В простейшей конфигурации используются две точки измерения: одна («приемник-датчик») расположена внутри зоны подготовки землетрясения, а другая («контрольный приемник») – за ее пределами. Принимаются во внимание два важных момента, касающихся расположения приемников:

- 1) приемники должны находиться на одной (или очень близкой) геомагнитной широте, чтобы обеспечить одинаковую реакцию на геомагнитные возмущения;
- 2) долготы приемников не должна сильно отличаться из-за зависимости реакции ионосферы на начало геомагнитной бури по местному времени.

Изменчивость ионосферы с точки зрения вариаций критической частоты foF2 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 foF2, вызванные геомагнитными возмущениями, могут быть исключены путем взаимной корреляции записей в данных точках, поскольку вариации foF2 будут практически идентичными для обеих станций. В [12] было показано, что 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 foF2, полученных на станциях вертикального радиозондирования ионосферы, во временном окне длительностью $n = 24$ часа по формуле [13]:

$$C_{foF2} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{1,i} - \bar{f}_1)(f_{2,i} - \bar{f}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{1,i} - \bar{f}_1)^2 \sum_{i=1}^n (f_{2,i} - \bar{f}_2)^2}} \quad (1)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первой и второй ионосферным станциям, f_i – часовые значения критической частоты, определяемые по ионограммам, $\bar{f}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n f_{1,i}}{n}$, $\bar{f}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_{2,i}}{n}$, $n = 24$.

Ионосферные вариации, вызванные геомагнитными возмущениями можно выделить, сравнивая коэффициенты автокорреляции значений foF2 нескольких станций. Коэффициенты автокорреляции показывают, насколько каждый последующий день взаимосвязан с предыдущим и вычисляются как коэффициенты корреляции значений foF2 одной станции с временным лагом в сутки. Каждое магнитное возмущение, вызывающее изменение суточного хода критической частоты, будет отслеживаться каждой станцией в виде падения коэффициента автокорреляции. Изменения в ионосфере, вызванные сейсмической активностью, будут выражены падением коэффициента автокорреляции только для станции, расположенной внутри зоны подготовки землетрясения.

Другим параметром, который может быть использован для оценки пространственной изменчивости ионосферы, является суточный максимум и минимальная разница часовых значений критических частот обеих станций [14]:

$$M = \max\{f_{1,i} - f_{2,i}\}_{i=0,k} \quad (2)$$

$$M = \min\{f_{1,i} - f_{2,i}\}_{i=0,k} \quad (3)$$

разница между индексами M и m будет означать повышенную изменчивость. В ряде случаев, использование этих показателей изменчивости может быть даже более эффективным [1].

Результаты применения методики

В данной работе сравнивались критические частоты foF2 двух ионосферных станций (рис. 1).

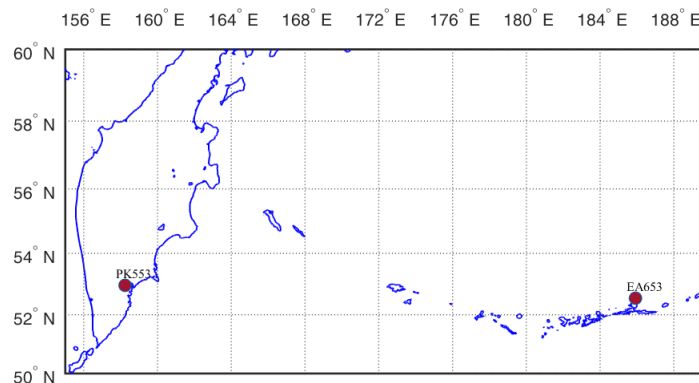


Рис. 1. Расположение ионосферных станций PK553 и EA653

Первая станция («приемник-датчик») PETROPAVLOVSK (PK553) расположена на п-ве Камчатка, одном из самых сейсмоактивных регионов планеты, в точке с координатами 52.97° с.ш. и 158.24° в.д. Вторая станция («контрольный приемник») – EARECKSON (EA653) расположена на Алеутских островах в точке с координатами 52.7° с.ш. и 185.9° в.д. Выбор станции EA653 в качестве контрольной обусловлен тем, что она расположена практически на одной и той же геомагнитной широте что и PK553. Кроме того, из всех ионосферных станций, чьи данные ионосферных измерений находятся в общем доступе (<http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>),

станция EA653 по своему местоположению является ближайшей к станции РК553. Район Алеутских островов также является сейсмоактивным, но его активность ниже, чем на Камчатке. Поэтому при сравнении критических частот foF2 рассматривались периоды, когда в радиусе до 500 км от станции EA653 не регистрировались сейсмические события с магнитудой $M \geq 6.0$. Период наблюдения был задан равным $T_H=18.08.2018-30.04.2021$ гг. Информация о произошедших землетрясениях была взята из каталога USGS NEIC (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>).

На рис. 2–5 представлены результаты расчетов на основе данных foF2 соответственно коэффициента корреляции, коэффициентов автокорреляции, а также коэффициентов t и M для станций РК553 и EA653 за период наблюдения T_H .

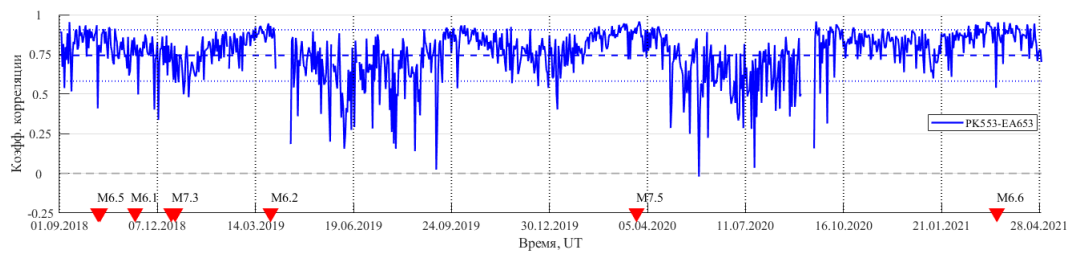


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между ионосферными станциями РК553 и EA653. Красными треугольниками на временной оси отмечены сейсмические события с $M \geq 6.0$, произошедшие на эпицентральных расстояниях $R \leq 500$ км от расположения ионосферной станции РК553

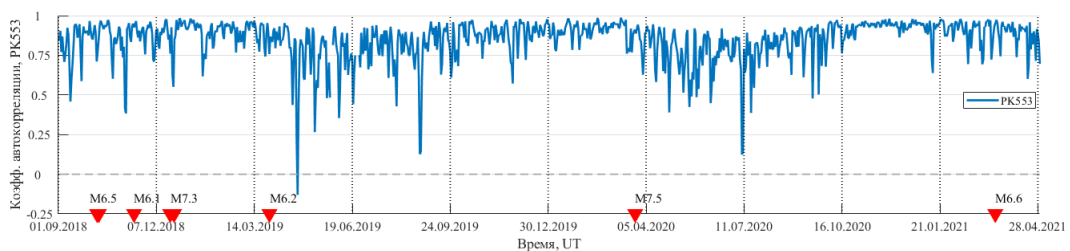


Рис. 3. Коэффициенты автокорреляции для ионосферной станции РК553. Красными треугольниками на временной оси отмечены сейсмические события с $M \geq 6.0$, произошедшие на эпицентральных расстояниях $R \leq 500$ км от расположения ионосферной станции РК553

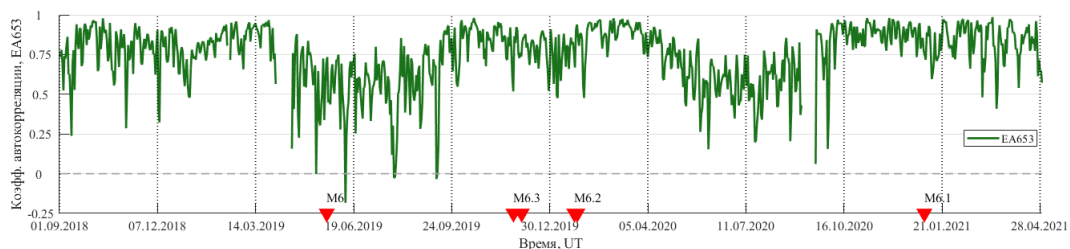


Рис. 4. Коэффициенты автокорреляции для ионосферной станции EA653. Красными треугольниками на временной оси отмечены сейсмические события с $M \geq 6.0$, произошедшие на эпицентральных расстояниях $R \leq 500$ км от расположения ионосферной станции EA653

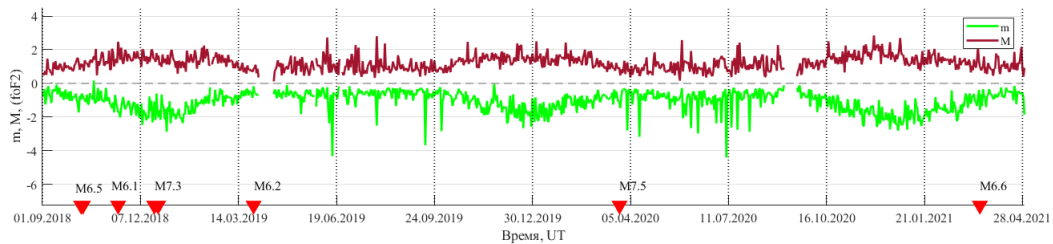


Рис. 5. Коэффициенты m и M для ионосферных станций РК553 и ЕА653. Красными треугольниками на временной оси отмечены сейсмические события с $M \geq 6.0$, произошедшие на эпицентральных расстояниях $R \leq 500$ км от расположения ионосферной станции РК553

По данным каталога USGS за период T_H на эпицентральных расстояниях $R \leq 500$ км от расположения ионосферной станции РК553 было зарегистрировано 8 землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ (таблица, рис. 6), произошедшие в период октябрь-декабрь 2018 г., а также в марте 2019 г., 2020 г. и 2021 г. За этот же период в окрестности ионосферной станции ЕА653 было зарегистрировано 6 землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, основная часть которых произошла в период с мая 2019 г. по январь 2020 г.

Таблица

Каталог Камчатских землетрясений с $M > 6.0$

Дата ЗТ	$\varphi, ^\circ$ с.ш.	$\lambda, ^\circ$ в.д.	$h, \text{ км}$	$R, \text{ км}$	M
09.10.2018 07:45:11	49.39	156.24	19	421	6.1
10.10.2018 23:16:02	49.29	156.29	20	431	6.5
14.11.2018 21:21:50	55.64	161.99	49	384	6.1
20.12.2018 17:01:55	55.09	164.69	16.56	483	7.3
24.12.2018 12:41:19	55.34	164.50	10	485	6.1
28.03.2019 22:06:49	50.49	159.94	9	299	6.2
25.03.2020 02:49:21	48.96	157.69	57.8	447	7.5
16.03.2021 18:38:21	54.73	163.18	13.23	378	6.6

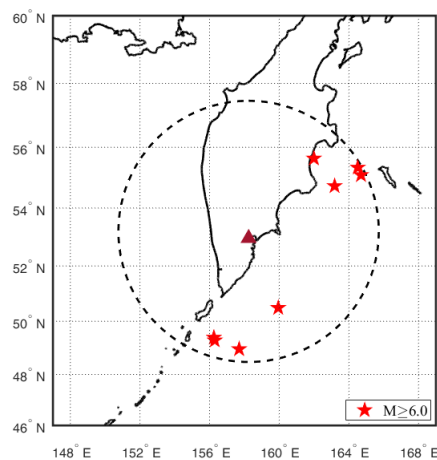


Рис. 6. Карта эпицентров Камчатских землетрясений с $M \geq 6.0$

Среднее значение коэффициента корреляции C_{ioF2} между станциями РК553 и ЕА653 за временной период T_H составило 0.74, а среднеквадратическое отклонение

составило 0.16. На рисунках 7–10 представлены вариации значений коэффициентов корреляции C_{ioF2} , предшествующие наступлению землетрясений с $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе.

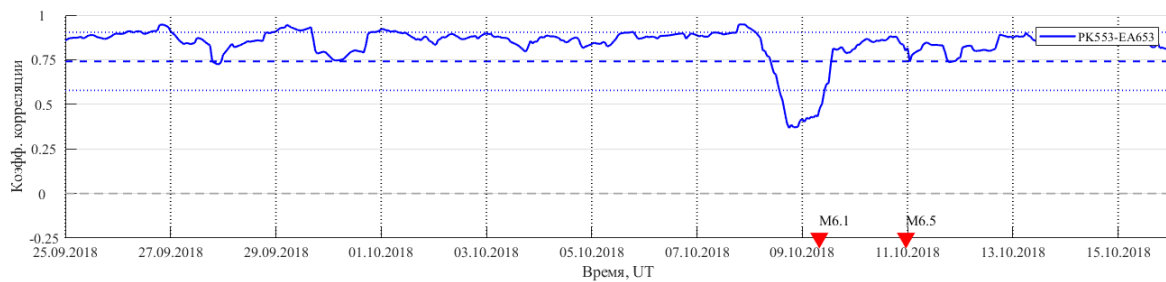


Рис. 7. Коэффициенты корреляции C_{ioF2} за период 25.09.2018–15.10.2018 гг. На временной оси отмечены землетрясения 09.10.2018 г. ($M = 6.1$, $h = 19$ км, $R = 421$ км) и 10.10.2018 г. ($M = 6.5$, $h = 20$ км, $R = 431$ км).

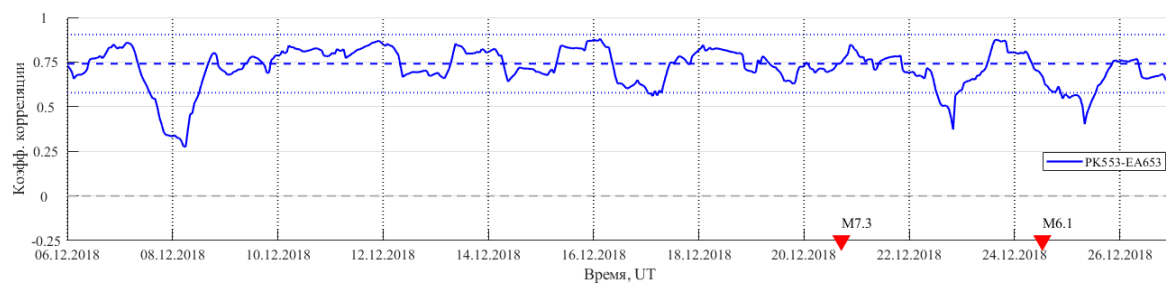


Рис. 8. Коэффициенты корреляции C_{ioF2} за период 06.12.2018–26.12.2018 гг. На временной оси отмечены землетрясения 20.12.2018 г. ($M = 7.3$, $h = 16.56$ км, $R = 483$ км) и 24.12.2018 г. ($M = 6.1$, $h = 10$ км, $R = 486$ км).

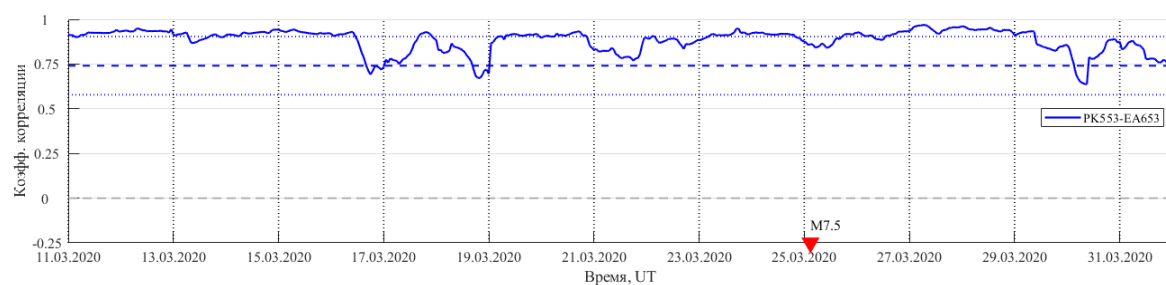


Рис. 9. Коэффициенты корреляции C_{ioF2} за период 11.03.2020–31.03.2020 гг. На временной оси отмечено землетрясение 25.03.2020 г. ($M = 7.5$, $h = 57.8$ км, $R = 447$ км).

Статистический анализ ионосферной обстановки показал уменьшение коэффициентов корреляции C_{ioF2} за сутки до наступления землетрясений 09.10.2018 г. с $M = 6.1$ и 10.10.2018 г. с $M = 6.5$ (рис.7), за 12 суток до наступления землетрясения 20.12.2018 г. с $M = 7.3$ и за сутки до землетрясения 24.12.2018 г. с $M = 6.1$ (рис.8), за четверо суток до наступления землетрясения 25.03.2020 г. с $M = 7.5$ (рис.9) и за сутки до землетрясения 16.03.2021 г. с $M = 6.6$ (рис.10). Землетрясениям 14.11.2018 г. с $M = 6.1$ и 28.03.2019 г. с $M = 6.2$ не предшествовало заметное уменьшение коэффициентов корреляции C_{ioF2} .

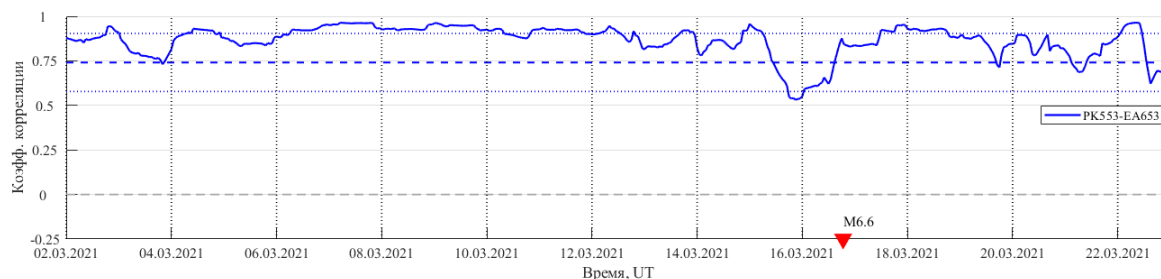


Рис. 10. Коэффициенты корреляции C_{foF2} за период 02.03.2021–22.03.2021 гг. На временной оси отмечено землетрясение 16.03.2021 г. ($M = 6.6$, $h = 13.23$ км, $R = 379$ км).

Заключение

Статистический анализ критической частоты $foF2$ показал, что заметное уменьшение значений коэффициента корреляции наблюдалось за 1–12 суток до наступления 6 из 8 сейсмических событий с $M \geq 6.0$, которые произошли на глубинах до 100 км и эпицентральных расстояниях до 500 км от расположения ионосферной станции РК553. Применение методики на основе анализа коэффициентов корреляции позволило выявить изменения в состоянии ионосферы, предшествовавших наступлению серии Камчатских землетрясений с $M \geq 6.0$. Данная методика может быть удобна при проведении ежедневного мониторинга ионосферной обстановки с целью выделения предвестников землетрясений.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литературы/References

1. Pulinets S.A. et al. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004. vol. 4, pp. 697–702.
2. Pulinets S.A. Seismic activity as a source of the ionospheric variability // *Adv. Space Res.*, 1998. vol. 22, pp. 903–906.
3. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer, 2004. 315 pp.
4. Pulinets S.A., Liu J.Y. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity // *Adv. Space Res.*, 2004. vol. 34, pp. 1926–1933
5. Pulinets S.A. et al. Model of Atmosphere-Thermosphere-Ionosphere Coupling // *Adv. Space Res.*, 2000. vol. 26, pp. 1209–1218
6. Kim V.P., Hegai V.V. On possible changes in the midlatitude upper ionosphere before strong earthquakes // *Earthq. Predict. Res.*, 1997. vol. 6, pp. 275–280
7. Пулинец С.А. и др. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот $foF2$ наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань) // *Геомagnetизм и астрономия*, 2002. Т. 42, № 4, С. 435–447. [Pulinets S.A. et al. Ionospheric precursors to earthquakes: a preliminary analysis of the $foF2$ critical frequencies at Chung-Li ground-based station for vertical sounding of the ionosphere (Taiwan island) // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2002. vol. 42, no. 4, pp. 508–513].
8. Chen Y.I. et al. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // *Terr. Atm. Ocean Sci.*, 2004. Т. 15, pp. 385–396.

9. Pulinets 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. Т. 42, pp. 221–229.
10. Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 1979. Т. 5, pp. 1025–1044.
11. Пулинец С.А., Лю Й.Я., Сафронова И.А. Интерпретация результатов статистического анализа вариаций критической частоты foF2 перед землетрясениями по данным ионосферной станции Чунг-Ли (Тайвань) // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2004. Т. 44, №1, С. 113–118. [Pulinets S.A., Liu J.Y., Safronova I.A. Interpretation of a statistical analysis of variations in the foF2 critical frequency before earthquakes based on data from Chung-Li ionospheric station (Taiwan) // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2004. vol. 44, no. 1, pp. 102–106].
12. Szuszczewicz E.P. et al. Global ionospheric storm characteristics during solar maximum equinox // *J. Geophys. Res.*, 1998. Т. 103, pp. 11665–11684.
13. Кобзарь А.И. *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с. [Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. М.: FIZMATLIT, 2006. 816 pp. (In Russian)]
14. Гайворонская Т.В., Пулинец С.А. *Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация*. М.: ИЗМИРАН, 2002. 20 с. [Gaivoronskaya T.V., Pulinets S.A. *Analysis of F2-layer variability in the areas of seismic activity*. М.: IZMIRAN, 2002. 20 pp. (In Russian)]

Identification of ionospheric earthquake precursors in Kamchatka region based on correlation analysis

V. V. Bogdanov, A. V. Pavlov

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

E-mail: vbogd@ikir.ru, pavlov@ikir.ru

Seismic activity is one of the sources of ionospheric variability. In this work, we investigate electron concentration change in the ionosphere, preceding the onset of strong earthquakes with $M \geq 6.0$ in Kamchatka region. The research technique is based on calculating the correlation coefficient between the critical frequency foF2 values at two ionospheric stations. One of them is located inside the earthquake preparation zone, and the other is outside it. The data obtained at two stations PETROPAVLOVSK (PK553) and EARECKSON (EA653) for the period 01.09.2018–30.04.2021 are considered. Statistical analysis of the critical frequencies foF2 showed that a noticeable decrease in the correlation coefficient was observed 1–7 days before the earthquakes for 6 out of 8 events with $M \geq 6.0$ that occurred at depths of up to 100 km and epicentral distances of up to 500 km from the PK553 location.

Keywords: ionosphere, lithosphere, vertical radio sounding, earthquake, earthquake precursor.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-150-158

Original article submitted: 14.10.2021

Revision submitted: 10.11.2021

For citation. Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Identification of ionospheric earthquake precursors in Kamchatka region based on correlation analysis. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **37**: 4, 150-158. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-150-158

Competing interests. The authors declare that 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.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2021

Funding. The study was carried out without financial support from foundations.