

Методика поиска информативных признаков перед землетрясениями в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона

Сенкевич Юрий Игоревич, <https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>, senkevich@ikir.ru

Малкин Евгений Ильич, <https://orcid.org/0000-0001-8037-1335>, malkin@ikir.ru

Дружин Геннадий Иванович, <https://orcid.org/0000-0002-1009-1044>

Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН, пос. Паратунка, Камчатский край, Россия

Резюме

[PDF RUS](#)

[PDF ENG](#)

Полный текст

[PDF RUS](#)

Резюме. Проблема поиска информативных признаков в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона связана с построением прогностической модели землетрясений. Цель работы заключается в разработке и апробации методики выявления информативных признаков путем анализа спектральной плотности мощности электромагнитного излучения с применением технологий глубокого машинного обучения. В ходе исследования применен комплексный подход, включающий непрерывный мониторинг электромагнитных сигналов в ОНЧ-диапазоне (0.3–30 кГц) и обработку данных с помощью сверточных нейронных сетей. На основе анализа массива данных по камчатским землетрясениям за 2016–2019 гг. (29 сильных сейсмических событий) были получены значимые результаты: разработана оригинальная методика подготовки данных для нейросетевой классификации с высокой точностью распознавания (до 96 %), подтверждено наличие предвестников землетрясения в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона. Научная новизна исследования заключается в разработке нового подхода к подготовке исходных данных в графическом формате и применении современных нейросетевых технологий для анализа геофизических сигналов, что позволило выявить скрытые паттерны, предшествующие сейсмическим событиям. Практическая значимость работы состоит в создании инструмента для мониторинга предвестников землетрясений, способствующего развитию систем раннего предупреждения и подтверждающего перспективность применения методов машинного обучения для анализа геофизических данных и прогнозирования природных явлений.

Ключевые слова:

землетрясение, предвестники, электромагнитное излучение, нейросетевой анализ

Для цитирования: Сенкевич Ю.И., Малкин Е.И., Дружин Г.И. Методика поиска информативных признаков перед землетрясениями в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона. *Геосистемы переходных зон*. 2026, т. 10, № 2, с. 225–237. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.225-237>; <https://www.elibrary.ru/gbwhpy>

For citation: Senkevich Yu.I., Malkin E.I., Druzhin G.I. Methodology for detecting for informative features before earthquakes in the electromagnetic regular noise background of the VLF range. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 225–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.225-237>; <https://www.elibrary.ru/gbwhpy>

Список литературы

1. Вершинин Е.Ф. *Низкочастотные шумовые излучения внешней ионосферы и магнитосферы*: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск, 1983, 28 с.
2. Вершинин Е.Ф., Пономарев Е.А. О классификации непрерывного УНЧ излучения верхней атмосферы. В кн.: *Земной магнетизм, полярные сияния и ультранизкочастотное излучение*. Иркутск: СИБИЗМИР, 1966, с. 35–43.
3. Дружин Г.И., Торопчинова Т.В., Шапаев В.И. Регулярный шумовой фон в ОНЧ-излучении и мировые очаги гроз. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986, 26(2):258.
4. Дружин Г.И. Суточные периоды в ОНЧ излучении и связь их с рентгеновским излучением. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015, 8-2(39):98–101.
5. *Низкочастотные излучения в ионосфере и магнитосфере Земли*. Распопов О.М. (ред.). Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1981, 167 с.

6. Дружин Г.И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением. *Вулканология и сейсмология*. 2002,6:51–62.
7. Asada T., Baba H., Kawazoe K., Sugiura M. An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes. *Earth, Planets and Space*. 2001,53:55–62.
<https://doi.org/10.1186/BF03352362>
8. Eftaxias K., Kapiris P., Polygiannakis J., Peratzakis A., Kopanas J., Antonopoulos G., Rigas D. Experience of short term earthquake precursors with VLF-VHF electromagnetic emissions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2002,20:1–12. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-217-2003>
9. Hayakawa M. Earthquake prediction with electromagnetic phenomena. *AIP Conference Proceedings*. 2016,17090(20002). <https://doi.org/10.1063/1.4941201>
10. Уваров В.Н. Характерные формы электромагнитных сигналов. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2018,2(22):112–127. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127>
11. Gershenzon N., Bambakidis G. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2001,3(4):247–275. <https://doi.org/10.2205/2001ES000058>
12. Wang J.-H. Piezoelectricity as a mechanism on generation of electromagnetic precursors before earthquakes. *Geophysical Journal International*. 2020,224(1):682–700. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa429>
13. Zhao J., Gao Y., Cheng Q., Zhou G., Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y. Numerical simulation of electromagnetic responses to an earthquake source due to the piezoelectric effect of '∞m' symmetry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024,129(5),e2023JB027756.
<https://doi.org/10.1029/2023JB027756>
14. Wang W., Xue X., Shan J. Theoretical models of seismic electromagnetic radiation based on piezoelectric effects. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2015,44(9):1275–1281.
15. Surkov V.V., Molchanov O.A., Hayakawa M. Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2003(2002),65(1):31–46. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00117-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00117-7)
16. Salikhov N., Shepetov A., Pak G., Nurakynov S., Ryabov V., Zhukov V. Seismogenic effects in variation of the ULF/VLF emission in a complex study of the lithosphere–ionosphere coupling before an M6.1 earthquake in the region of Northern Tien Shan. *Geosciences*. 2025,15(6):203.
<https://doi.org/10.3390/geosciences15060203>
17. Park S.K. Precursors to earthquakes: Seismoelectromagnetic signals. *Surveys in Geophysics*. 1996,17:493–516. <https://doi.org/10.1007/BF01901642>
18. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms. *Reviews of Geophysics*. 1993,31:117–132. <https://doi.org/10.1029/93RG00820>
19. Nagao T., Enomoto Y., Fujinawa Y., Hata M., Hayakawa M., Huang Q., Izutsu J., Kushida Y., Maeda K., Oike K., Uyeda S., Yoshino T. Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake. *Journal of Geodynamics*. 2002,33:349–359. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00004-2)
20. Enomoto Y., Zheng Z. Possible evidences of earthquake lightning accompanying the 1995 Kobe earthquake inferred from the Nojima Fault Gouge. *Geophysical Research Letters*. 1998,25:2721–2724.
<https://doi.org/10.1029/98GL02015>
21. Hayakawa M., Hobara Y., Ohta K., et al. The ultra-low-frequency magnetic disturbances associated with earthquakes. *Earthquake Science*. 2011,24:523–534. <https://doi.org/10.1007/s11589-011-0814-2>
22. Devi M., Barbara A.K., Ruzhin Ya.Yu., Hayakawa M. Over-the-horizon anomalous VHF propagation and earthquake precursors. *Surveys in Geophysics*. 2012,33(5):1081–1106. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9185-z>
23. Hayakawa M., Itoh T., Hattori K., Yumoto K. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on 17 February 1996. *Geophysical Research Letters*. 2000,27:1531–1534.
<https://doi.org/10.1029/1999GL005432>
24. Ida Y., Yang D., Li Q., Sun H., Hayakawa M. Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to an earthquake in China with an improved polarization analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2008,8:775–777. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-775-2008>
25. Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Surveys in Geophysics*. 1997,18:441–475. <https://doi.org/10.1023/a:1006500408086>
26. Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A., et al. A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004,29:627–637.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.063>
27. Hayakawa M. Review of subionospheric VLF/LF radio signals for the study of seismogenic lower-ionospheric perturbations. *Atmosphere*. 2025,16(11):1312. <https://doi.org/10.3390/atmos16111312>
28. Uyeda S., Nagao T., Hattori K., Hayakawa M., Miyaki K., Molchanov O., Gladyshev V., Baransky L., Chtchekotov A., Fedorov E., Pokhotelov O., Andreevsky S., Rozhnoi A., Khabazin Y., Gorbatiykov A., Gordeev E., Chebrov V., Sinitzin V., Lutikov A., Yunga S., Kosarev G., Surkov V., Belyaev G. Geophysical

- observatory in Kamchatka region for monitoring of phenomena connected with seismic activity. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2001,1:3–7. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-3-2001>
29. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere wave-guide. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1989,57:64–67. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90214-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90214-8)
30. Бузевич А.В., Дружин Г.И., Фирстов П.П. и др. Гелиогеофизические эффекты, предвзвешивающие Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. В кн.: *Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия*. Петропавловск-Камчатский, 1999, с. 177–188.
31. Hulbert C., Rouet-Leduc B., Johnson P.A., Ren C.X., Rivière J., Bolton D.C., Marone C. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning. *Nature Geoscience*. 2018,12:69–74. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0272-8>
32. Rouet-Leduc B., Hulbert C., Lubbers N., Barros K., Humphreys C.J., Johnson P.A. Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophysical Research Letters*. 2017,44(18):9276–9282. <https://doi.org/10.1002/2017GL074677>
33. Pu Y., Apel D.B., Wei C. Applying machine learning approaches to evaluating rockburst liability: A comparison of generative and discriminative models. *Pure and Applied Geophysics*. 2019,176:4503–4517. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02197-1>
34. Mousavi S.M., Horton S.P., Langston C.A., Samei B. Seismic features and automatic discrimination of deep and shallow induced-microearthquakes using neural network and logistic regression. *Geophysical Journal International*. 2016,207(1):29–46. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw258>
35. Sharma M., Arora M. Prediction of seismicity cycles in the Himalayas using artificial neural network. *Acta Geophysica Polonica*. 2005,53(3):299–309.
36. Nardi A., Pignatelli A., Spagnuolo E. A neural network based approach to classify VLF signals as rock rupture precursors. *Scientific Reports*. 2022,12,13744. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17803-x>
37. Lawhern V.J., Solon A.J., Waytowich N.R., et al. EEGNet: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*. 2018,15(5),056013. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aace8c>
38. Ince T., Kiranyaz S., Gabbouj M.A. Generic and robust system for automated patient-specific classification of ECG signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009,56(5):1415–1426. doi:10.1109/TBME.2009.2013934
39. Graves A., Mohamed A.R., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2013, p. 6645–6649. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6638947>
40. Bergen K.J., Johnson P.A., de Hoop M.V., Beroza G.C. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*. 2019,363(6433). <https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
41. Kong Q., Trugman D.T., Ross Z.E., Bianco M.J., Meade B.J., Gerstoft P. Machine learning in seismology: turning data into insights. *Seismological Research Letters*. 2018,90(1):3–14. <https://doi.org/10.1785/0220180259>
42. Никитин В.В., Дучков А.А., Андерссон Ф. Применение NVidia CUDA для ускорения обработки сейсмических данных при помощи разложения по волновым пакетам. *Вычислительные методы и программирование*. 2017,18(3):293–311.
43. Wu N., Green B., Ben X., O'Banion S. Deep transformer models for time series forecasting: the influenza prevalence case. *arXiv*. 2020. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08317>
44. Perol T., Gharbi M., Denolle M. Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances*. 2018,4(2),e1700578. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700578>
45. Efitorov A., Dolenko S. A new type of a wavelet neural network. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2018,27(3):152–160. <https://doi.org/10.3103/s1060992x18030050>
46. Efitorov A., Dolenko S.A., Dolenko T. Use of wavelet neural networks to solve inverse problems in spectroscopy of multi-component solutions. *Studies in Computational Intelligence*. 2020,856:285–294. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30425-6_33
47. Малкин Е.И., Дружин Г.И. Аппаратно-программный комплекс и методика наблюдений ОНЧ–излучений на Камчатке. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2025,51(2):122–141. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-122-141>
48. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.). *Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН*. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения: 12.05.2026).