SPORADIC RADIO EMISSION OF SPACE OBJECTS AT LOW-FREQUENCIES

V. V Zakharenko, V N Karazin, V. B Ryabov, I. P Kravtsov, K. Yu. Yu Mylostna, V. Yu. Yu Kharlanova, I. y Vasylieva, O. M Ulyanov, O. O Konovalenko, M. M Kalinichenko, et al.

▶ **To cite this version:**

V. V Zakharenko, V N Karazin, V. B Ryabov, I. P Kravtsov, K. Yu. Yu Mylostna, et al.. SPORADIC RADIO EMISSION OF SPACE OBJECTS AT LOW-FREQUENCIES. Radio physics and radio astronomy, 2021, 26 (2), pp.99-129. 10.15407/rpra26.02.099 . hal-03367792

HAL Id: hal-03367792
https://hal.science/hal-03367792v1

Submitted on 14 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RPRA
RADIO PHYSICS AND RADIO ASTRONOMY
Radio phys. radio astron.
DOI: https://doi.org/10.15407/rpra

ISSN 2415-7007 (Online)
ISSN 1027-9636 (Print)

SPORADIC RADIO EMISSION OF SPACE OBJECTS AT LOW-FREQUENCIES

DOI: https://doi.org/10.15407/rpra26.02.099

V. V. Zakharenko, V. B. Ryabov, I. P. Kravtsov, K. Yu. Mylostna, V. Yu. Kharlanova, I. Y. Vasylieva, O. M. Ulyanov, O. O. Konovalenko, M. M. Kalinichenko, P. Zarka, H. O. Rucker, G. Fischer, S. M. Yerin, J.-M. Grießmeier, M. A. Sydorchuk, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk, V. A. Shevchenko

Abstract

Purpose: The results of studies of sporadic radio emission of several types of space radio sources, including neutron stars and planets of the Solar System, are presented. The aim of this work is to review the latest achievements in the study of low-frequency radio emission of the Solar System planets and transient signals similar to pulsar pulses using the UTR-2 radio telescope. The importance of the development of the verification methods of the spaceborne radio emission in the study of sporadic signals from various sources is shown.

Design/methodology/approach: The studies of sporadic signals of different nature are based on the common set of procedures for cleaning records from the terrestrial radio frequency interference (RFI) in the frequency-time pattern using the information on the nature of the particular type of sporadic radio emission, possible types of interference and signal distortion. Characteristic features of sporadic radio emission of different sources are given, and for each of them the optimal method of signal extraction is developed. The efficiency of the developed procedures for cleaning from noise using adjustable parameters is shown. This is done on the basis of observations of diverse types of space radio sources, such as lightnings in the atmospheres of planets, single pulses of neutron stars and sporadic radio emission of Jupiter.

Findings: The developed methods of signal extraction detection in the presence of radio-interference have allowed obtaining the unique results such as: the distribution of the total intensity of single pulses of neutron stars depending on the galactic latitude; the automatic search of lightnings in the Saturn's atmosphere in data due to the carefully elaborated RFI mitigation procedures, which made it possible to obtain the Saturn electrostatic discharge (SED) emission parameters based on the most complete set of events. Increased efficiency of the selection of Jupiter's S-radiation signals despite the data corruption by the presence of radio-interference, which was reached due to the carefully chosen parameters of data cleaning procedures, have allowed us to detect short and intensive bursts, being the most informative for determining the physical parameters of radio emission in the area of their generation.

Conclusions: The large effective area and high sensitivity of the UTR-2 radio telescope allow making the sporadic radio emission study with high temporal and frequency resolutions. Due to these factors we can apply a wide range of methods of space signals' detection in the presence of terrestrial radio-frequency interference of natural and artificial origin. The data cleaning parameters allow accounting for the characteristic features of space signals and to obtain important and even unique scientific results.

Key words: decameter wavelength range; UTR-2; sporadic radio emission; transients; lightning in the atmospheres of planets; Jupiter S-bursts

Manuscript submitted 21.05.2021

Radio phys. radio astron. 2021, 26(2): 099-129

REFERENCES

1. MCLAUGHLIN, M. A., LYNE, A. G., LORIMER, D. R., KRAMER, M., FAULKNER, A. J., MANCHESTER, R. N., CORDES, J. M., CAMILO, F., POSSENTI, A., STAIRS, I. H., HOBBS, G., D'AMICO, N., BURGAY, M. and O'BRIEN, J. T., 2006. Transient radio bursts from rotating neutron stars. *Nature.* vol. 439, is. 7078, pp. 817–820. DOI: https://doi.org/10.1038/nature04440

2. BURKE, B. F. and FRANKLIN, K. L., 1955. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter. *J. Geophys. Res.* vol. 60, is. 2, pp. 213–217. DOI: https://doi.org/10.1029/JZ060i002p00213

3. KAISER, M. L., DESCH, M. D., WARWICK, J. W. and PEARCE, J. B., 1980. Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn. *Science.* vol. 209, is. 4462, pp. 1238–1240. DOI: https://doi.org/10.1126/science.209.4462.1238

4. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., LYTVYNENKO, L. M., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEPKIN, S. V., SHEPELEV, V. A., ZARKA, P., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., PANCHENKO, M., BRUCK, YU. M., TOKARSKY, P. L., BUBNOV, I. M., YERIN, S. M., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., KALINICHENKO, M. M., STANISLAVSKY, O. O., DOROVSKYY, V. V., KHRISTENKO, O. D., SHEVCHENKO, V. V., BELOV, O. S., GRIDIN, A. O., ANTONOV, O. V., BOVKUN, V. P., REZNICHENKO, O. M., BORTSOV, V. M., KVASOV, G. V., OSTAPCHENKO, L. M., SHEVCHUK, M. V., SHEVCHENKO, V. A., YATSKIV, YA. S., VAVILOVA, I. B., BRAUDE, I. S., SHKURATOV, Y. G., RYABOV, V. B., PIDGORNY, G. I., TYMOSHEVSKY, A. G., LYTVYNENKO, O. O., GALANIN, V. V., RYABOV, M. I., BRAZHENKO, A. I., VASHCHISHIN, R. V., FRANTSUZENKO, A. V., KOSHOVYY, V. V., IVANTYSHYN, O. L., LOZINSKY, A. B., KHARCHENKO, B. S., VASYLIEVA, I. Y., KRAVTSOV, I. P., VASYLKIVSKY, Y. V., LITVINENKO, G. V., MUKHA, D. V., VASYLENKO, N. V., SHEVTSOVA, A. I., MIROSHNICHENKO, A. P., KUHAI, N. V., SOBOLEV, YA. M., and TSVYK, N. O., 2021. The founder of the decameter radio astronomy in Ukraine academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 years old: history of creation and development of the national experimental base for the last half century. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 1, pp. 5–73. (in Ukrainian). DOI: https://doi.org/10.15407/rpra26.01.005

5. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. A., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEßMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: https://doi.org/10.1007/s10686-016-9498-x

6. MYLOSTNA, K. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., FISCHER, G., ZARKA, P. and SIDORCHUK, M. A., 2014. Fine time structure of lightnings on Saturn. *Radio Phys. Radio Astron.* vol.19, no. 1, pp.10–19. (in Russian). DOI: https://doi.org/10.15407/rpra19.01.010

7. ZAKHARENKO, V. V., 2011. Sporadic Radiation of Radio Astronomy Sources and its Study at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 16, no. 2, pp. 121–134. (in Russian). DOI: https://doi.org/10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.10

8. WARWICK, J. W., PARCE, J. B., EVANS, D. R., CARR, T. D., SCHAUBLE, J. J., ALEXANDER, J. K., KAISER, M. L., DESCH, M. D., PEDERSEN, M., LECACHEUX, A., DAIGNE, G., BOISCHOT, A. and BAROW, C. H., 1981. Planetary Radio Astronomy Observations from Voyager 1 Near Saturn. *Sience.* vol. 212, is. 4491, pp. 239–243. DOI: https://doi.org/10.1126/science.212.4491.239

9. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEßMEIER, J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2013. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus.* vol. 224, is. 1, pp. 14–23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.07.024

10. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, C., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., FISCHER, G., GRIEßMEIER, M., LITVINENKO, G., RUCKER, H., SIDORCHUK, M., RYABOV, B., VAVRIV, D., RYABOV, V., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., KOZHYN, R., VINOGRADOV, V., MUKHA, D., WEBER, R., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2012. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* vol. 61, is. 1, pp. 53–59. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.07.021

11. RYABOV, V. B., VAVRIV, D. M., ZARKA, P., RYABOV, B. P., KOZHIN, R., VINOGRADOV, V. V. and DENIS, L., 2010. A low-noise, high dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. Astrophys.* vol. 510. id. A16. pp. 1–13. DOI:https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913335

12. ZAKHARENKO, V. V., NIKOLAENKO V. S., ULYANOV, O. M. and MOTIYENKO, R. A., 2007. A High Time Resolution Receiver for Radio Emission Investigation. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 3, pp. 233–241. (in Russian).

13. MYLOSTNA, K., ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., KOLYADIN, V., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., SIDORCHUK, M., RUCKER, H., FISCHER, G., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., NIKOLAENKO, V. and SHEVCHENKO, V., 2013. Study of Saturn electrostatic discharges in a wide range of time scales. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 26, is. 2, pp. 251–253.

14. MYLOSTNA, K. Y. and ZAKHARENKO, V. V., 2013. Search and Study of Storm Activity on Saturn and Other Planets of the Solar System. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 1, pp. 12–25. (in Russian).

15. FISCHER, G., KURTH, W. S., GURNETT, D. A., ZARKA, P., DYUDINA, U. A., INGERSOLL, A. P., EWALD, S. P., PORCO, C. C., WESLEY, A., GO, C. and DELCROIX, M., 2011. A giant thunderstorm on Saturn. *Nature.* vol. 475, pp. 75–77. DOI: https://doi.org/10.1038/nature10205

16. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, K., KONOVALENKO, A., KOLYADIN, V., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., SIDORCHUK, M., RUCKER, H., FISCHER, G., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2013. Study of Saturn electrostatic discharges with high time resolution. In: *European Planetary Sciences Congress Abstracts.* London, 08–13 September 2013. vol. 8, id. EPSC2013-130

17. RYABOV, B. P., and GERASIMOVA, N. N., 1990. *Sporadic Radio Emission of Jupiter at Decameter.* Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka. (in Russian).

18. RYABOV, B. P., 1986. Decametric radio emission of Jupiter. II. Localization of the S-component radiation region. *Astronomichrskii Vestnik.* vol. 20, no. 1, pp. 20–34. (in Russian).

19. RYABOV, B. P., 1990. Directional pattern of the S-component of the decameter radio emission of Jupiter. *Astronomichrskii Vestnik.* vol. 24, no. 3, pp. 221–231. (in Russian).

20. RYABOV, B. P. and SHEVCHENKO, V. A., 1982. Hardware complex for studying decameter radiation of Jupiter on the UTR-2 radio telescope. *Radio astronomy equipment, antennas, and techniques.* Yerevan, Armenia: Izd-vo AN ArmSSR, pp. 178–179.

21. RYABOV, B. P., ARKHIPOV, A. V. and SHEVCHENKO, V. A., 1985. Decametric radio emission of Jupiter. I. The morphology of S-burst storms. *Astronomichrskii Vestnik.* vol. 19, no. 4, pp. 296–318. (in Russian).

22. RYABOV, B. P., 1990. Decametric radio emission of Jupiter. III: Some physical characteristics of S-component sources. *Astronomicheskii Vestnik.* vol. 24, no. 2, pp. 103–118. (in Russian).

23. RYABOV, B. P., 1988. Decameter radio emission from Jupiter. IV. S-radiation pattern structure. *Astronomicheskii Vestnik.* vol. 22, no. 2. pp. 21–29. (in Russian).

24. RYABOV, B. P., 1994. Jovian S emission: Model of radiation source. *J. Geophys. Res. Planet.* vol. 99, is. E4, pp. 8441–8449. DOI:https://doi.org/10.1029/93JE02525

25. RYABOV, B. P., 1992. Jovian S-emission: Decametric high sensitivity observations and model of radiation source. In: H. O. RUCKER, S. J. BAUER, and M. L. KAISER, eds. *Planetary Radio Emissions III, 3rd International Workshop Proceedings.* September 2-4, 1991. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, pp. 125–144.

26. RYABOV, B. P., 2001. Jovian Decametric Emission. Multiscale Dynamic Spectra. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 6, no. 1, pp. 103–130. (in Russian).

27. RYABOV, B. P., ZARKA, P., RUCKER H. O., RYABOV, V. B. and BOUDJADA, M. Y., 1997. Recurrent fine structures in Jovian S-burst emission. In: H. O. RUCKER, S. J. BAUER, and A. LECACHEAUX, eds. *Planetary Radio Emission IV, 4rd International Workshop Proceedings.* September 9-11, 1996. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press. pp. 65–89.

28. RYABOV, B. P., ZARKA, P., RUCKER, H. O., RYABOV, V. B. and BOUDJADA, M. Y., 1997. Jovian Decametric Emission: Regular Variabilities and Scale Invariants in S-Burst Dynamic Spectra. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 4, pp. 402–418.

29. LITVINENKO, G. V., LECACHEUX, A., RUCKER, H. O., KONOVALENKO, O. O., RYABOV, B. P., VYNOGRADOV, V. V., SHAPOSHNIKOV, V. E. and TAUBENSCHUSS, U., 2006. Modulation Effects on Dynamic Spectra of Sporadic Jovian Decameter Emission. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 2, pp. 325–347. (in Russian).

30. LITVINENKO, G. V., RUCKER, H. O., VINOGRADOV, V. V., LEITNER, M. and SHAPOSHNIKOV, V. E., 2004. Internal structure of the Jovian simple S-burst obtained with the wavelet analysis technique. *Astron. Astrophys.* vol. 426, pp. 343–351. DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361:200400018

31. RYABOV, V. B., RYABOV, B. P., VAVRIV, D. M., ZARKA, P., KOZHIN, R., VINOGRADOV, V. V. and SHEVCHENKO, V. A., 2007. Jupiter S-bursts: Narrow-band origin of microsecond subpulses. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 112, is. A9, id. A09206. DOI: https://doi.org/10.1029/2007JA012607

32. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P.,ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEßMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: https://doi.org/10.1142/S2251171716410105

33. *ULYANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, O. O., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2006.* Detection of Individual Pulses from Pulsars B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08 and B1133+16 in the Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 2, pp. 113–133. (in Russian).

34. *ULYANOV, O. M., DESHPANDE, A., ZAKHARENKO, V. V., ASGEKAR, A. and SHANKAR, U., 2007.* Two-Frequency Observations of Six Pulsars Using UTR-2 and GEETEE Radio Telescopes. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 1, pp. 5–20. (in Russian).

35. UL'YANOV, O. M. and ZAKHARENKO, V. V., 2012. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 56, is. 6. pp. 417–429. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063772912060054

36. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 1997. Structure and Parameters of New System of Antenna Amplification of Radio Telescope UTR-2. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 1, pp. 95–102. (in Russian).

37. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 2001. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 11, is. 2, pp. 85–112. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1011109128284

38. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.-M., COGNARD, I. and NIKOLAENKO, V. S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 431, is. 4, pp. 3624–3641. DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/stt470

39. ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., FISCHER, G., KONOVALENKO, O. O., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.–M., RYABOV, B. P., VAVRIV, D. M., RYABOV, V. B., RUCKER, H. O., RAVIER, P., SIDORCHUK, M. A., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., KOZHYN, R. V., MUKHA, D. V., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., SHEVCHENKO, V. A., VYNOGRADOV, V. V., WEBER, R. and NIKOLAENKO, V. S., 2010. Identification of Saturn Lightnings Recorded by the UTR-2 Radio Telescope and Cassini Spacecraft. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 15, no. 4, pp. 361–368. (in Russian). DOI: https://doi.org/10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i2.10

40. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SEREDKINA, A. A., 2013. Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 26, is. 2, pp. 159–161. DOI: 10.18524/1810-4215.2013.26.82470

41. OFFRINGA, A. R., DE BRUYN, A. G., BIEHL, M., ZAROUBI, S., BERNARDI, G. and PANDEY, V. N., 2010. Post-correlation radio frequency interference classification methods. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 405, is. 1, pp. 155–167. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x

42. VASYLIEVA, I. Y. Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results [online]. 2015. Phd Thesis ed. Observatoire de Paris [viewed 19 April 2021]. Available from: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634

43. TKACHOV, V. M., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., TSARIN, YU. A., BANNIKOVA, E. YU., ILYUSHIN, V. V., SAVANEVYCH, V. E., GERASIMENKO, O. V., ANNENKOV, O. B., KULISHENKO, S. F. and KULISHENKO, D. F., 2013. Using grid-technologies for solving problems in radio physics and radio astronomy. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 2, pp. 176–188. (in Russian).

44. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O., ZARKA, P. and KONOVALENKO, O. O., 2016. Search for Transient Signals in the Data of Decameter Survey of Northern Sky. *Adv. Astron. Space Phys.* vol. 6, is. 2, pp. 79–84. DOI: https://doi.org/10.17721/2227-1481.6.79-84

45. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2014. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. First Results. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 3, pp. 197–205. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra19.03.197

46. MYLOSTNA, K. Y., ZAKHARENKO, V. V., FISCHER, G., KONOVALENKO, A. A. and ZARKA, P., 2017. Study of SED's emission parameters. In: G. FISCHER, M. PANCHENKO, and P. ZARKA, eds. *Planetary Radio Emissions VIII, 8th International Workshop Proceedings.* October 25-27, 2016. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, pp. 223–231.

47. RYABOV, V. B., ZARKA, P., HESS, S., KONOVALENKO, A., LITVINENKO, G., ZAKHARENKO, V., SHEVCHENKO, V. A. and CECCONI, B., 2014. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys.* vol. 568, id. A53. DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423927

48. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2016. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the Northern sky. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 29, pp. 179–183. DOI: https://doi.org/10.18524/1810-4215.2016.29.85210

49. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O. and MYKHAILOVA, S. S., 2016. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Observations and Data Processing. In: *9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016.* Kharkiv, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538020

50. ZAKHARENKO, V. V., KRAVTSOV, I. P., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M. and KOLYADIN, V. L., 2018. Search for Low-Intensity Interference and Distributions of Transient Signals' Characteristics in the Data of Decameter Survey of Northern Sky. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 23, no. 2, pp. 79–93. (in Russian). DOI: https://doi.org/10.15407/rpra23.02.079

51. ZAKHARENKO, V. V., KRAVTSOV, I. P. and VASYLIEVA, I. Y., 2017. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northen Sky. Parameters of Individual Pulses. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 1, pp. 31–44. (in Russian). DOI: https://doi.org/10.15407/rpra22.01.031

52. KRAVTSOV, I. P., 2018. *Survey of the Northern sky in order to find sporadic radio emission sources in decameter wave range.* PhD thesis ed. Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University. (in Ukrainian).

53. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., SHEVTSOVA, A. I., YERIN, S. M., ULYANOV, O. M., KONOVALENKO, O. O., VASYLKIVSKYI, Y. V. and MYASOYED, A. I., 2020. First detection at the decameter wavelengths and clarification of radiation parameters of PSR J2325-0530, PSR J0613+3731, and PSR J1426+52 radio pulsars. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 25, no. 3, pp. 193–210. (in Ukrainian). DOI: https://doi.org/10.15407/rpra25.03.193

54. MANCHESTER, R. N., HOBBS, G. B., TEOH, A. and HOBBS, M., 2005. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* vol. 129, is. 4, pp. 1993–2006. DOI: https://doi.org/10.1086/428488

55. CSIRO., 2020. *ATNF Pulsar Catalogue.* Australia Telescope National Facility. [online table]. [viewed 3 May 2021]. Available from: https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/

56. HANKINS, T. H., KERN, J. S., WEATHERALL, J. C. and EILEK, J. A., 2003. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar. *Nature.* vol. 422, pp. 141–143. DOI: https://doi.org/10.1038/nature01477

57. HANKINS, T. H. and EILEK, J. A., 2007. Radio emission signatures in the Crab Pulsar. *Astrophys. J.* vol. 670, is. 1, pp. 693–701. DOI: https://doi.org/10.1086/522362

58. JOHNSTON, S. and ROMANI, R. W., 2003. Giant pulses from PSR B0540–69 in the Large Magellanic Cloud. *Astrophys. J.* vol. 590, is. 2, pp. L95–L98. DOI: https://doi.org/10.1086/376826

59. WEST VIRGIAN UNIVERSITY. 2016. *The RRATalog* [online]. Morgantown, USA: West Virgian University. [viewed 3 May 2021]. Available from: http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/

60. KEANE, E. F. and KRAMER, M., 2008. On the birthrates of Galactic neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 391, is. 4, pp. 2009–2016. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14045.x

61. MALOFEEV, V. M., MALOV, O. I. and TEPLYKH, D. A., 2007. Radio emission from AXP and XDINS. *Astrophys. Space. Sci.* vol. 308, pp. 211–216 DOI: https://doi.org/10.1007/s10509-007-9341-y

62. VOGES, W., ASCHENBACH, B., BOLLER, TH., BRÄUNINGER, H., BRIEL, U., BURKERT, W., DENNERL, K., ENGLHAUSER, J., GRUBER, R., HABERL, F., HARTNER, G., HASINGER, G., KÜRSTER, M., PFEFFERMANN, E., PIETSCH, W., PREDEHL, P., ROSSO, C., SCHMITT, J. H. M. M., TRÜMPER, J. and ZIMMERMANN, H. U., 1999. The ROSAT all–sky survey bright source catalogue. *Astron. Astrophys.* vol. 349, pp. 389–405. DOI: https://doi.org/10.1017/S0074180900129237

63. KONDRATIEV, V. I., MCLAUGHLIN, M. A., LORIMER, D. R., BURGAY, M., POSSENTI, A., TUROLLA, R., POPOV, S. B. and ZANE, S., 2009. New limits on radio emission from X-ray dim isolated neutron stars. *Astrophys. J.* vol. 702, is. 1, pp. 692–706. DOI: https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/692

64. HODOSÁN, G., HELLING, C. and RIMMER, P. B., 2017. Exo-lightning radio emission: the case study of HAT-P-11b. *arXiv:1711.08053 [astro-ph.EP].* DOI: https://doi.org/10.1553/PRE8s345

65. KRAVTSOV, I., ZAKHARENKO, V., VASYLIEVA, I., ULYANOV, O., YERIN, S., VASYLKIVSKYI, Y. and KONOVALENKO, O., 2020. Detection of repetitive pulses from the sporadic decameter radio emission source. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW).* Kharkiv, Ukraine, pp. 800–804. DOI: https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252720

66. APLIN, K. L., FISCHER, G., NORDHEIM, T. A., KONOVALENKO, A., ZAKHARENKO, V. and ZARKA, P., 2020. Atmospheric Electricity at the Ice Giant. *Space Sci. Rev.* vol. 216, is. 2, id. 26. DOI: https://doi.org/10.1007/s11214-020-00647-0

Keywords

decameter wavelength range; UTR-2; sporadic radio emission; transients; lightning in the atmospheres of planets; Jupiter S-bursts

Full Text:

PDF

Licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) .

ABOUT THE AUTHORS

V. V. Zakharenko
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61002, Ukraine

V. B. Ryabov
Complex and Intelligent Systems Dept., Future University Hakodate, 116-2 Kamedanakano-cho, Hakodate, Hokkaido, Japan 041-8655,
Japan

I. P. Kravtsov
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

K. Yu. Mylostna
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

V. Yu. Kharlanova
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

I. Y. Vasylieva
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

O. M. Ulyanov
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

O. O. Konovalenko
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

M. M. Kalinichenko
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine; Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, 24, Kyivo-Moskovska St., Hlukhiv, 41400,
Ukraine

P. Zarka
LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, PSL/SU/UPMC/UPD/SPC, 5, Place Jules Janssen, Meudon, F-92195,
France

H. O. Rucker
Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, 6, Schmiedlstraße, Graz, 8042,
Austria

G. Fischer
Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, 6, Schmiedlstraße, Graz, 8042,
Austria

S. M. Yerin
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

J.-M. Grießmeier
LPC2E/CNRS, Université d'Orléans, 3A, Avenue de la Recherche Scientifique 45071, Orléans cedex 2,
France

M. A. Sydorchuk
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

A. I. Shevtsova
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

A. O. Skoryk
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

V. A. Shevchenko
Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002,
Ukraine

Радіофізика і радіоастрономія, 2021, Т. 26, № 2, с. 99–129

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: https://doi.org/10.15407/rpra26.02.099

УДК 524.354.4, 520.27

В. В. ЗАХАРЕНКО [1,2], В. Б. РЯБОВ [3], І. П. КРАВЦОВ [1],
К. Ю. МИЛОСТНА [1], В. Ю. ХАРЛАНОВА [1], Я. Ю. ВАСИЛЬЄВА [1],
О. М. УЛЬЯНОВ [1], О. О. КОНОВАЛЕНКО [1],
М. М. КАЛІНІЧЕНКО [1,4], Ф. ЗАРКА [5], Г. О. РУКЕР [6], Г. ФІШЕР [6],
С. М. ЄРІН [1], Ж.-М. ГРІСМАЙЄР [7], М. А. СИДОРЧУК [1],
А. І. ШЕВЦОВА [1], А. О. СКОРИК [1], В. А. ШЕВЧЕНКО [1]

[1] Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

[2] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61000, Україна

[3] Університет майбутнього,
116-2, Камеданакано-чо, Хакодате, Хоккайдо, 041-8655, Японія

[4] Глухівський національний педагогічний університет ім. О. Довженка,
вул. Києво-Московська, 24, м. Глухів, 41400, Україна

[5] Лабораторія космічних досліджень і астрофізичного приладобудування,
Паризька обсерваторія, медонський філіал,
пл. Жюля Янсена, 5, м. Медон, F-92195, Франція

[6] Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук,
вул. Шмідльштрасе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

[7] Лабораторія фізики і хімії довкілля та космосу,
Національний центр наукових досліджень, Орлеанський університет,
пр. Наукових досліджень, 3А, м. Орлеан 2, 45071, Франція

СПОРАДИЧНЕ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА НИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ

Присвячується 110-річчю Семена Яковича Брауде
та 50-річчю радіотелескопа УТР-2

Предмет і мета роботи: *Наведено результати досліджень спорадичного радіовипромінювання деяких типів космічних джерел, серед яких – нейтронні зорі, а також планети Сонячної системи. Метою роботи є огляд останніх досягнень у дослідженнях низькочастотного радіовипромінювання планет Сонячної системи та транзієнтних сигналів, аналогічних імпульсам пульсарів, на радіотелескопі УТР-2. Показано важливість розробки методів верифікації космічної природи радіовипромінювання у дослідженні спорадичних сигналів різних джерел.*

Методи та методологія: *При вивченні спорадичних сигналів різної природи спільним є набір процедур очищення записів від радіочастотних завад земного походження в частотно-часовій області з використанням інформації про характер досліджуваного в даний момент типу спорадичного радіовипромінювання, про можливі типи завад і спотворень сигналів на шляху їх поширення. Наведено характерні особливості спорадичного випромінювання різних джерел і для кожного з них розроблено оптимальну методику виділення сигналів. Показано ефективність розроблених процедур очищення від завад різних типів за допомогою настроюваних параметрів. Це зроблено на прикладах спостережень різних джерел космічного радіовипромінювання, таких як блискавки в атмосферах планет, одиночні імпульси нейтронних зір і спорадичне радіовипромінювання Юпітера.*

Результати: *Розроблені методи виділення сигналів на тлі завад дозволили отримати унікальні дані щодо джерел спорадичного радіовипромінювання: для одиночних імпульсів нейтронних зір було побудовано розподіл сумарної інтенсивності джерел залежно від галактичної широти; процедури очищення даних спостережень блискавок у атмосфері Сатурна дозволили автоматизувати їх пошук, що дало змогу отримати параметри випромінювання, ґрунтуючись*

на найбільш повному наборі подій. Селекція сигналів S-випромінювання Юпітера на тлі радіочастотних завад завдяки параметрам процедур очищення даних дозволила якнайповніше зберігати короткі й інтенсивні сплески випромінювання, які є максимально інформативними для визначення фізичних параметрів радіовипромінювання в області генерації.
Висновки: *Велика ефективна площа та чутливість УТР-2 дозволяють виконувати дослідження спорадичного радіовипромінювання з високою часовою та частотною роздільними здатностями. Це дає змогу застосувати широкий набір методів селекції космічних сигналів на тлі земних завад природного та штучного походження. Параметри очищення даних дозволяють найкращим чином врахувати характерні особливості сигналів певних типів космічних джерел і отримати важливі (а іноді й унікальні) наукові результати.*

Ключові слова: *декаметровий діапазон, УТР-2, спорадичне випромінювання, одиночні імпульсні сигнали, блискавки в атмосферах планет, S-сплески в радіовипромінюванні Юпітера*

1. Вступ

На низьких частотах у генерації космічного радіовипромінювання над тепловим механізмом превалюють нетеплові. Деякі з типів випромінювання з тих чи інших причин мають не континуальний, а спорадичний характер. Інтерес до дослідження спорадичного радіовипромінювання космічних об'єктів постійно зростає. Процеси, які породжують імпульсне, спорадичне та транзієнтне (одноразове, неповторюване) випромінювання дозволяють глибше зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються як у самих космічних об'єктах, так і в середовищі поширення радіовипромінювання. Типи таких джерел систематизовані на так званій "транзієнтній фазовій площині" (рис. 1).

На рис. 1 представлено широкий спектр транзієнтних джерел. Наведена залежність дозволяє зв'язати (в одиницях еквівалентної яскравісної температури) потік випромінювання і відстань до джерела з частотою та характерною тривалістю імпульсного випромінювання. Показано похилі лінії постійної яскравісної температури. Температуру 10^{12} К умовно прийнято межею, що розділяє теплові (некогерентні) та когерентні механізми випромінювання. Поблизу цієї межі знаходяться активні ядра галактик (AGN). У верхній частині рисунку розташовуються далекі (як правило позагалактичні) та потужні джерела, в нижній – слабкі та близькі. Через розсіяння в міжзоряному середовищі, стала часу якого зростає пропорційно f^{-4}, швидкі зміни інтенсивності випромінювання (імпульси, короткі сплески) сильно "замиваються". Тому на найнижчих частотах можна досліджувати спорадичне випромінювання лише близьких об'єктів. До них можна віднести різні нейтронні зорі (пульсари, транзієнти, що обертаються – RRAT [1], магнетари), бурі коротких (мілісекунди та частки мілісекунд) сплесків радіовипромінювання на Юпітері (JupDAM) [2], блискавки на планетах Сонячної системи (SED і UED) [3]. Використання для досліджень найбільшого у світі декаметрового радіотелескопа УТР-2 [4, 5] дозволило отримати важливі (а іноді унікальні) наукові результати.

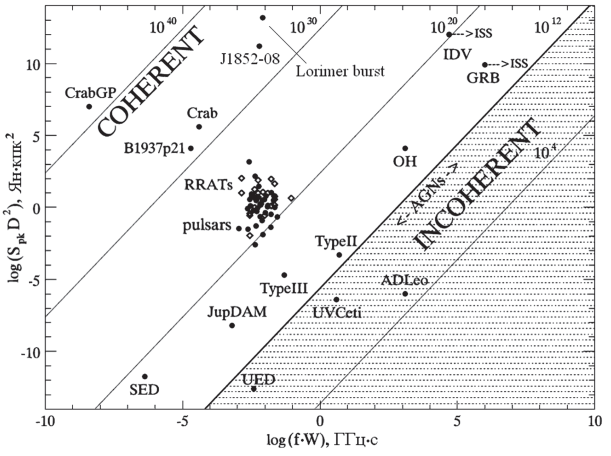


Рис. 1. Транзієнтна фазова площина: абсциса є добутком спостережної частоти та тривалості транзієнтного сигналу, ордината є псевдосвітністю (добуток пікової густини потоку та квадрату відстані до джерела)

Характеристики радіотелескопа відіграють дуже важливу роль. Його велика ефективна площа дозволяє отримати високу миттєву чутливість, що дало змогу, наприклад, відкрити тонку часову структуру радіовипромінювання блискавок у атмосфері Сатурна [6]. Це не було зроблено жодним із космічних апаратів (КА), що пролітали в тисячі разів ближче до планети, ніж знаходиться земний спостерігач.

У роботі [7] наведено результати та напрямки досліджень спорадичного низькочастотного випромінювання космічних джерел станом на 2010 р. Метою ж цієї статті є огляд нещодавніх результатів дослідження спорадичного та транзієнтного радіовипромінювання космічних об'єктів

на радіотелескопі УТР-2 й опис методів отримання цих результатів.

Важливою особливістю дослідження спорадичного радіовипромінювання є первинна обробка індивідуальних подій – імпульсів або сплесків, виділення їх на тлі набагато потужніших земних радіочастотних завад і використання якомога більшого набору критеріїв, які підтверджують космічне походження сигналів. Це стало дуже актуальним з розвитком цифрової реєструючої широкосмугової та завадостійкої апаратури. Для сигналів різних типів джерел існує дуже велика подібність етапів очищення від завад, і досвід, отриманий у процесі обробки, наприклад, записів блискавок позаземного походження, виявляється затребуваним у пошуці одиночних імпульсів інших джерел космічного радіовипромінювання.

У другому розділі статті описано виявлення блискавок у атмосфері Сатурна, історію досліджень Юпітера на УТР-2, а також пошуку джерел транзієнтного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні. У третьому розділі описано методи очищення від завад записів, що містять спорадичні сигнали, конвеєри обробки й особливості налаштування параметрів утиліт для аналізу радіовипромінювання різних типів космічних об'єктів під час дослідження спорадичних сигналів від джерел у Сонячній системі та джерел у близькому галактичному оточенні. У четвертому розділі наведено результати дослідження випромінювання блискавок у атмосфері Сатурна, поточних досліджень спорадичного радіовипромінювання Юпітера й останні результати детектування транзієнтних сигналів у близькому галактичному оточенні ($1.5 \div 2$ кпк). У п'ятому розділі наведено висновки й описано подальші перспективи.

2. Історія досліджень спорадичного і транзієнтного випромінювання космічних джерел на радіотелескопі УТР-2

2.1. Пошук блискавок у атмосфері Сатурна

Окремі спостереження Сатурна в декаметровому діапазоні проводилися з моменту створення УТР-2. Вони не мали успіху, однак, після виявлення КА "Вояджер" електростатичних розрядів на Сатурні (Saturn Electrostatic Discharges – SED) [8], пошукові спостереження на різних радіотелескопах надзвичайно активізувалися (див. [9]). Оцінки показували можливість детектування сигналів SED телескопом із такою великою ефективною площею, яку має УТР-2. При цьому спектральна густина потоку радіовипромінювання, що приймається КА поблизу Сатурна, є в понад мільйон разів вищою за ту, що приймається радіотелескопом, розташованим на Землі (відстань до Сатурна – $8 \div 9$ а. о.). Протягом останніх 15 років на УТР-2 проводилися міжнародні дослідження з метою пошуку радіовипромінювання SED українськими, французькими й австрійськими радіоастрономами. Перше виявлення SED (рис. 2) за допомогою наземного радіотелескопа, а саме УТР-2, [9] на окремих частотах (у діапазоні $19 \div 26$ МГц із шириною парціальної смуги від 10 кГц до 1 МГц) було зроблено завдяки даним КА "Кассіні" та повідомленню в січні 2006 р. від австрійського радіоастронома Г. О. Рукера про початок так званого шторму E (після зближення КА "Кассіні" з Сатурном у 2003 р. шторми іменувалися в такій послідовності: 0, A, B, C, ... і далі латинськими літерами). Результатом цих спостережень було виявлення 69 сигналів, які відповідали заздалегідь розробленим критеріям. Записи велися на 6 різних частотах (19.85, 20.14, 23.45, 23.75, 25.25 та 25.75 МГц) і з часовою роздільною здатністю 20 мс. Спостереження проводилися в режимі суми та добутку сигналів антен "Північ–Південь" і "Схід–Захід" у режимі "ON–OFF" (ON – промінь спрямовувався на Сатурн, OFF – на 1° від планети в північному напрямку). Приклад детектування наведено на рис. 2.

Однак через невигідне розташування КА відносно Сатурна та земного спостерігача (кут "Земля – Сатурн – КА" становив понад 100°) одночасність реєстрації тих самих розрядів (звичайно, з урахуванням часу поширення) не вдалося підтвердити прямим зіставленням. І, незважаючи на те, що характеристики продетектованих сигналів (наприклад, гістограми розподілу блискавок за тривалістю) добре збігалися з відомими (зі спостережень за допомогою КА) характеристиками SED, все ще залишалася ймовірність того, що було зареєстровано земні радіочастотні завади. Остаточно питання реєстрації наземним радіотелескопом блискавок у атмосфері Сатурна вирішили спостереження шторму F [10] (листо-

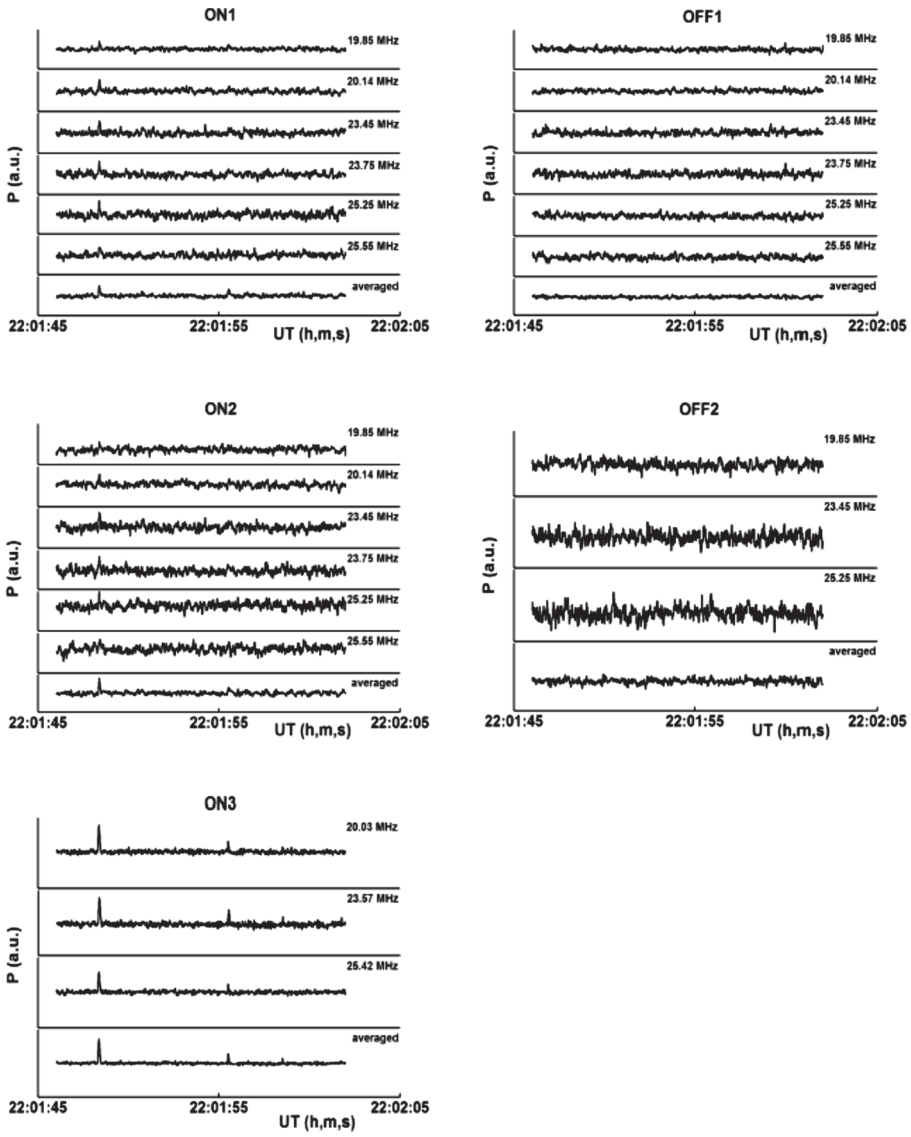


Рис. 2. Детектування сигналів блискавок на окремих частотах у діапазоні $19 \div 26$ МГц 30 січня 2006 р.: ліворуч – сигнали каналів, спрямованих на Сатурн (ON1 – сума сигналів антен "Північ–Південь" і "Схід–Захід", парціальна смуга 10 кГц; ON2 – добуток тих самих сигналів із тією ж самою смугою; ON3 – добуток тих самих сигналів із парціальною смугою 1 МГц); праворуч – сигнали референтних каналів, відхилених від джерела на 1° (канали OFF) [9]

пад–грудень 2007 р.), інформацію про початок якого було отримано від французьких і австрійських колег. У цей час на радіотелескопі вже було встановлено два цифрові приймачі: один – із широкою смугою ($8 \div 33$ МГц) і розрахунком спектрів у реальному часі [11], другий – зі смугою 3 МГц і безперервним записом на диск результатів аналого-цифрового перетворення (так званий режим waveform) із часовою роздільною здатністю 170 нс і подальшим розрахунком спектрів [12]. Ці обставини, а також вдале розташування КА "Кассіні" (кут "Земля – Сатурн – КА" становив близько 25°) дозволили виділити за допомогою режиму спостережень "ON–OFF" сотні потужних сигналів, які показали збіг у часі з даними КА "Кассіні" з похибкою не більше ніж 30 мс. Подальша обробка даних waveform-приймача дозволила виявити дисперсійну затримку потужних широкосмугових сигналів на рівні значення міри дисперсії (DM – Dispersion Measure) $\sim 10^{-5}$ пк·см$^{-3}$ [13]. Ці результати блискуче підтвердилися під час спостереження шторму J [14] (грудень 2010 р. – серпень 2011 р.) – найпотужнішого за всю історію досліджень

грозової активності на Сатурні [15]. Дані з КА "Кассіні" про початок цього шторму надав Г. Фішер (Австрія), і тижнева сесія спостережень на УТР-2 дозволила отримати надзвичайно цінні результати. Було відкрито тонку структуру блискавок у атмосфері Сатурна – аж до складових, тривалістю порядку мікросекунд [6, 16]. У розділі 4 буде описано основні результати цих досліджень.

2.2. Дослідження радіовипромінювання Юпітера на УТР-2

Результати багаторічних досліджень радіовипромінювання Юпітера на УТР-2 неодноразово публікувалися у вигляді статей і монографій [17].

Станом на кінець 70-х рр. XX століття роботи зі створення та тестування антенної системи УТР-2 здебільшого було завершено й основні зусилля було спрямовано на створення реєструвальної апаратури, оскільки прогресу в дослідженнях радіовипромінювання Юпітера можна було досягти значною мірою завдяки розробці нових систем запису й обробки сигналів. Для цих цілей було створено багатоканальну систему реєстрації на основі паралельного спектроаналізатора [18], що складається із тридцяти автономних вузькосмугових приймачів зі смугою, що змінюється в межах $3 \div 10$ кГц, і можливістю ручного регулювання центральної частоти для уникнення завад. Запис амплітуди сигналу на виході квадратичних детекторів у кожному каналі здійснювався пір'яними самописцями, що дозволяло в реальному часі проводити спостереження нестаціонарних процесів у широкому діапазоні частот. Типовий запис радіобурі Юпітера, отриманий за допомогою описаного вище спектроаналізатора, наведено на рис. 3.

Основні статистичні властивості радіобур Юпітера, що були в фокусі досліджень у 80-х рр. минулого століття, знайшли своє відображення в монографії [17], де було проаналізовано записи, отримані протягом 67 спостережних ночей на радіотелескопі УТР-2 в 1980–1982 рр. Комбінація високої чутливості та широкосмуговості антенної системи з електронною системою супроводу джерела випромінювання протягом кількох годин зробила УТР-2 унікальним на той час інструментом, що дозволяв відстежити детальну морфологію радіобур і створити адекватні моделі джерела радіовипромінювання. В результаті було проведено детальні дослідження частотної залежності випромінювання від діаграми спрямованості джерела, що привело до розробки низки фізичних моделей процесів, що відповідають за виникнення та часову еволюцію радіобур Юпітера [17].

Запропоновані моделі дали змогу пояснити низку параметрів частотно-кутової структури конічної діаграми спрямованості, оцінити місце розташування джерела випромінювання відносно поверхні планети [18, 19], проаналізувати зв'язок джерела випромінювання зі структурою планетарного магнітного поля, виявити деякі деталі тонкої структури динамічних спектрів (S-сплесків) і запропонувати низку гіпотез, що пояснюють різні характеристики випромінювання.

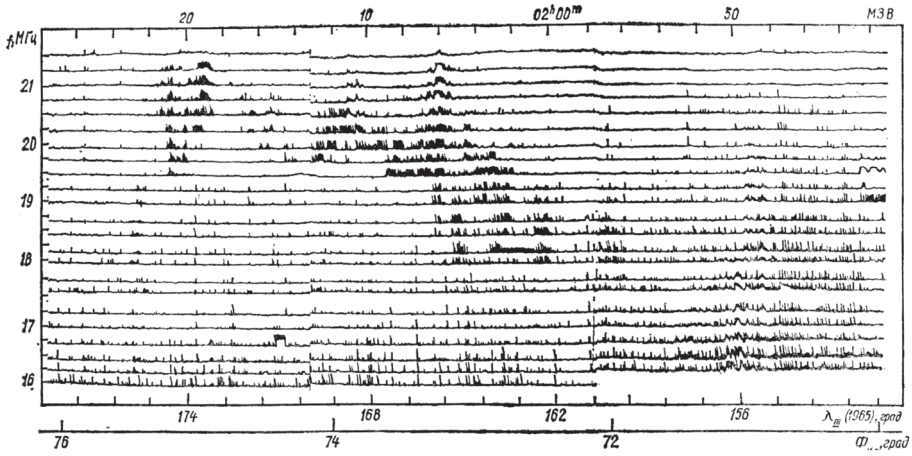


Рис. 3. Спектрограма юпітеріанської бурі Io-B, записана 26 квітня 1982 р. на багатоканальному спектроаналізаторі з пір'яними самописцями [17]. Шкала часу спрямована справа наліво

Результати численних спостережень і систематичного моделювання було опубліковано в низці робіт [18–24] і представлено на міжнародних конференціях (“Planetary Radio Emissions III”, 3rd International Workshop, Graz, Austria, September 2-4, 1991 [25]; “Variable phenomena in Jovian planetary system”, Annapolis, USA, July 13-16, 1992). Зміст досліджень викликав жвавий інтерес науковців із різних країн, які працювали в галузі дослідження декаметрового радіовипромінювання планет, зокрема дослідників з Паризької астрофізичної обсерваторії (Париж–Медон, Франція) та Інституту космічних досліджень Австрійської академії наук (Грац, Австрія), що привело до початку плідної багаторічної співпраці й ініціації кількох міжнародних проєктів із вивчення радіовипромінювання Юпітера, деякі з них тривають дотепер.

Варто зазначити, що на цьому етапі досліджень завадова обстановка в районі розташування УТР-2 не створювала істотних проблем як через нечисленність завадових сигналів, так і через порівняно невеликий обсяг даних, що записувалися аналоговими самописцями. Боротьбу з завадами здійснював постійно присутній на спостережній сесії оператор, який вручну налаштовував кожен з каналів приймальної системи в реальному часі. Оператор за допомогою рукояток налаштування приймачів за частотою просто обирав частотні смуги, вільні від завад, приблизно рівномірно розподіляючи їх всією спостережною смугою.

Зауважимо, що така система запису сигналів має низку очевидних обмежень, які не дозволяють виявляти часові зміни спектральних характеристик, що відбуваються швидше, ніж за кілька секунд, а також дослідити процеси, що демонструють швидкий частотний дрейф (порядку кількох мегагерц на секунду). Недоліки у створеної системи запису стимулювали подальші кроки в розробці нового покоління апаратури для запису даних спостережень із деталізацією динамічних спектрів, що грунтується на застосуванні комп’ютерних технологій. У рамках спільних (Україна – Австрія – Франція) дослідницьких програм на радіотелескопі УТР-2 було встановлено нові системи реєстрації для дослідження мілісекундних імпульсів Юпітера (S-сплесків) на основі широкосмугового акусто-оптичного спектроаналізатора (АОС) із частотною роздільною здатністю – до 15 кГц і з часовою – до 5 мс (Франція) та на основі 30-канального спектрографа з рекордними на той час характеристиками часової роздільної здатності – до 2 мс (Австрія).

Для запису процесів, що повільно еволюціонують і характеризують бурі декаметрового випромінювання в цілому, було прийнято до експлуатації французьку комп’ютерну систему на основі спектроаналізатора скануючого типу фірми Hewlett Packard, аналогічну системі, встановленій на декаметровому радіотелескопі в Нансе (Франція).

Спільне застосування всіх вищезгаданих реєструючих пристроїв дозволило виділити в динамічних спектрах юпітеріанських радіобур п’ять частотно-часових спектральних масштабів, і для кожного було створено окремі, але взаємопов’язані фізичні моделі [26]. Приклад спектрограми, яка ілюструє процес масштабування частотно-часових структур, наведено на рис. 4. Хотілося б відзначити радикальні зміни в деталізації динамічних спектрів і в подальшому аналізі процесів різного часового та просторового масштабів, обумовлені істотним прогресом у створенні нового покоління реєструвальної апаратури, а також застосуванням програмних методів придушення завадових сигналів, що базуються на статистичному аналізі імпульсних завад та видалення численних вузькосмугових завадових сигналів. Порівняння рис. 3 із практично аналогічним йому з точки зору масштабів частотно-часового діапазону рис. 4, *а* доводить суттєві переваги цифрових технологій над аналоговими методами реєстрації.

Систематичні спостереження радіобур Юпітера та подальша обробка даних у 90-х рр. привели до появи цілої низки теорій, припущень та інтерпретацій, пов’язаних із фізичним моделюванням джерела випромінювання [26–28]. Однак водночас ставали зрозумілими обмеження та недоліки використовуваного устаткування та комп’ютерних програм, які, зокрема, не дозволяли отримати безперервний запис тривалих радіобур із високою частотно-часовою роздільною здатністю, досягти високої роздільної здатності спектрального аналізу, а також довільно варіювати роздільну здатність динамічних спектрів у подальшому аналізі мультимасштабних

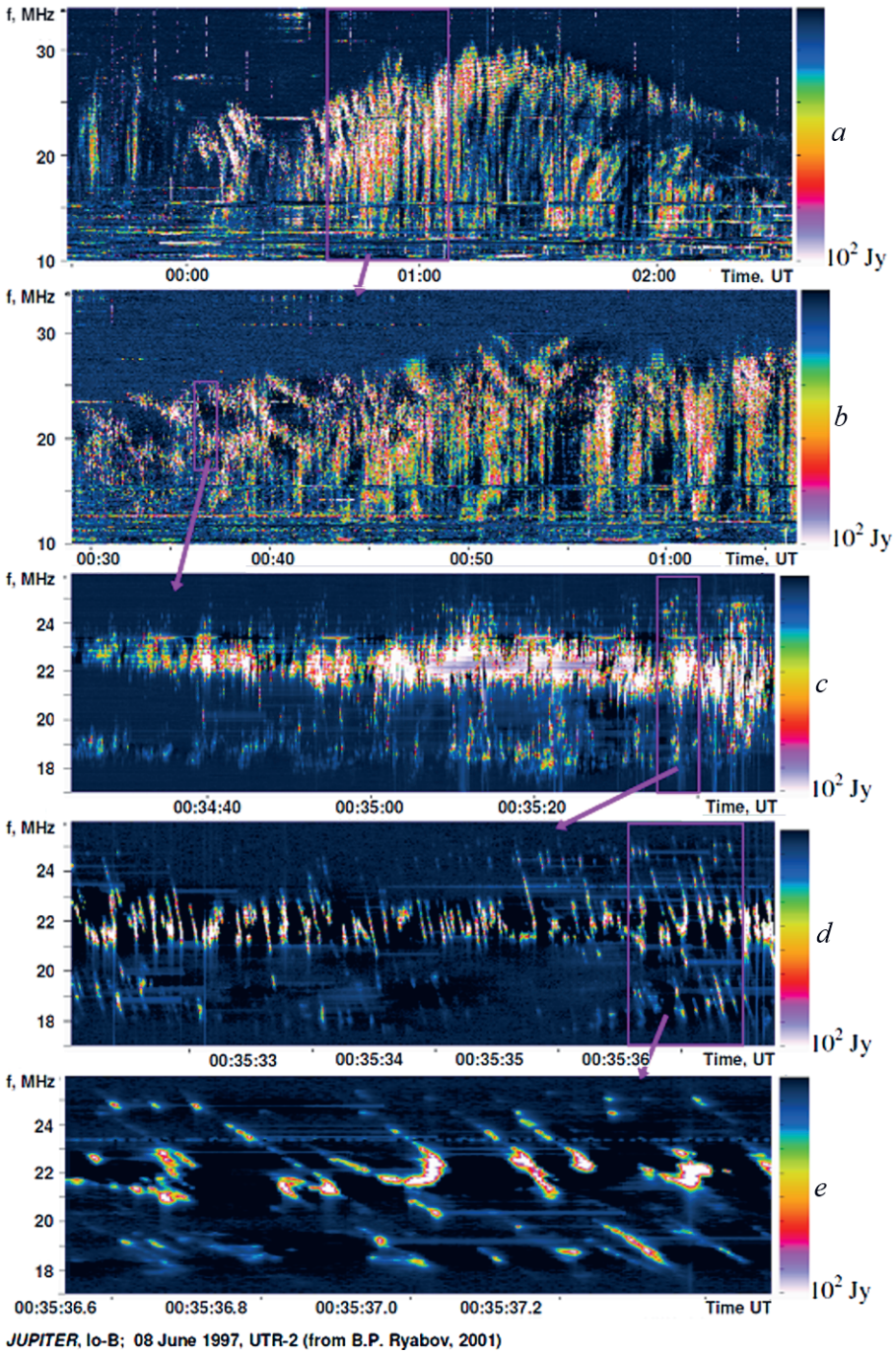


Рис. 4. Мультимасштабний динамічний спектр радіобурі джерела Io-B 8 червня 1997 р. [26]: *a* – великомасштабний спектр бурі в цілому, *b* – спектр випромінювання неоднорідностей трубки Io, *c* – статистичний спектр S-компоненти, *d* – серія S-сплесків, *e* – спектри тонкої структури. Стрілки вказують на збільшені фрагменти спектрів

структур. На подолання цих недоліків у реєструвальній апаратурі та відповідному програмному забезпеченні було спрямовано основні зусилля в першій декаді XXI століття, коли було сформульовано основні вимоги та намічено принципові підходи до створення наступного покоління повністю цифрових пристроїв запису радіосигналів, що грунтуються як на прямому записі коливань струму на виході антенної системи на жорсткий диск (waveforms), так і на розрахунку спектрограм у режимі реального часу з можливістю попереднього встановлення їх частотно-часової

роздільної здатності (arbitrary resolution Spectrogram) на апаратному рівні.

Перші експерименти, у яких використовувалося нове покоління цифрових пристроїв [29–31], продемонстрували широкі можливості для аналізу юпітеріанських сигналів із необмеженою роздільною здатністю як за часом, так і за частотою. Зокрема, було проведено детальні дослідження властивостей когерентності S-сплесків, які демонструють лінійний частотний дрейф, і продемонстровано відповідність основних статистичних характеристик випромінювання для часових масштабів порядку 0.1 мс моделям джерела, що ґрунтуються на ефекті мазерного підсилення електромагнітних хвиль [31] намагніченою плазмою, яка рухається в сильному магнітному полі Юпітера, що зазнає впливу швидкого обертання.

Розробка цифрового приймача нового покоління завершилася створенням комп'ютеризованої системи (див. рис. 5 [11]), що складається з аналого-цифрового перетворювача, цифрового модуля розрахунку перетворення Фур'є в реальному часі, а також програмного комплексу підтримки обчислень, що дозволяє контролювати процес обчислень, коригувати та записувати дані у зручному форматі. Подальше використання нової системи наочно продемонструвало її високу ефективність для аналізу не лише сигналів Юпітера, але й декаметрового випромінювання інших об'єктів, таких як Сонце, пульсари, газові хмари, Сатурн та ін. [32].

Зазначимо, що широкий динамічний діапазон і висока частотно-часова роздільна здатність у динамічних спектрах на виході приймального тракту ведуть до записів великого обсягу даних (~1 ТБ за 8-годинний сеанс спостереження), які, особливо в останні роки, часто супроводжуються завадами різноманітного походження. Ці завади характеризуються різними значеннями смуги частот, нестаціонарністю та частотним дрейфом, що призводить до утворення складних завадових структур різного масштабу на частотно-часовій площині. Це, зі свого боку, створює необхідність розробки нових алгоритмів очищення динамічних спектрів від завад, ефективних за наявності нестаціонарних, швидко мінливих сигналів і схожих на них завад у ділянках, що перекриваються за частотою та часом.

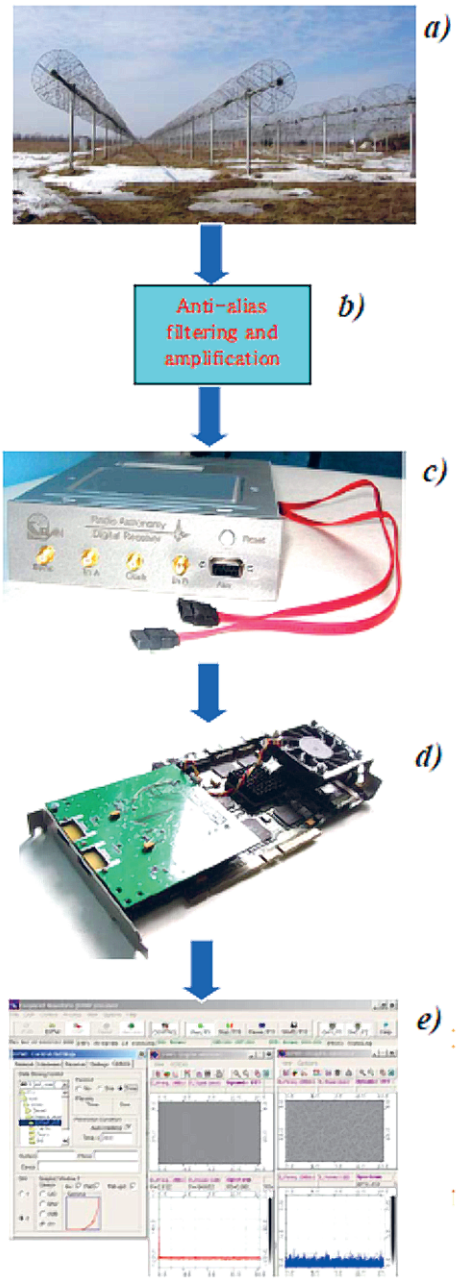


Fig. A.1. Signal path from the antenna system to the control display of the host computer. **a)** UTR-2 antenna array; **b)** anti-alias filters and amplifiers block; **c)** ADC module; **d)** DSP board to be plugged into a PCI-X slot of the host PC; **e)** snapshot of the host PC display during an observation session.

Рис. 5. Комп'ютеризована система спостережень на радіотелескопі УТР-2 [11]

Особливістю обробки при цьому є коректне усунення нехарактерних для Юпітера сигналів, оскільки за рівнем інтенсивності S-сплески можуть перевищувати як природні, так і штучні завади земного походження. У розділі 3 буде приділено

уваги особливостям усунення завад із записів радіовипромінювання Юпітера, а в розділі 4 буде наведено деякі останні результати досліджень.

2.3. Пошук джерел транзієнтного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні

Радіотелескоп УТР-2 було введено до дії через кілька років після відкриття пульсарів, тому тематика пошуку імпульсного декаметрового випромінювання космічних джерел завжди була присутня у програмах радіоастрономічних досліджень на УТР-2. Слід підкреслити, що в декаметровому діапазоні значну частину пульсарів можна реєструвати не лише за накопиченим середнім профілем імпульсу, а й за індивідуальними імпульсами завдяки відкритому на УТР-2 явищу аномально інтенсивних імпульсів [33–35]. Чутливість радіотелескопа під час детектуванні індивідуальних імпульсів (як і спорадичного радіовипромінювання блискавок) також істотно зросла після установки широкосмугової ($8 \div 33$ МГц) системи підсилення [36, 37] і реєструючої апаратури [32]. Для ефективної боротьби з завадами важливо також те, що високочутлива та завадостійка апаратура досягла рівнів часової та частотної роздільних здатностей близько 1 мс і 1 кГц відповідно. За такої умови реєстрація імпульсів пульсарів як широкосмугових сигналів із дисперсійною затримкою між верхніми та нижніми частотами (пропорційно f^{-2}) стала ефективною з огляду на високу точність визначення міри дисперсії на низьких частотах [38].

Після успішного виявлення більшості відомих близьких пульсарів стало очевидним, що пошук індивідуальних і повторюваних сигналів від близьких (до 2 кпк) нейтронних зір або інших джерел імпульсного радіовипромінювання є досяжною метою. В тому, що необхідність такого дослідження – "сліпого" огляду всього Північного неба з метою пошуку імпульсних і транзієнтних джерел випромінювання – назріла, сумніву не було. З 2011 по 2016 рр. цей огляд був здебільшого завершений, однак важливість підтвердження космічної природи виявлених у ньому сигналів була надзвичайно високою. Тому у 2018 р. було проведено частковий повторний огляд 15 % Північного неба. Завдання виділення космічних сигналів на тлі різноманітних радіозавад стало першочерговим.

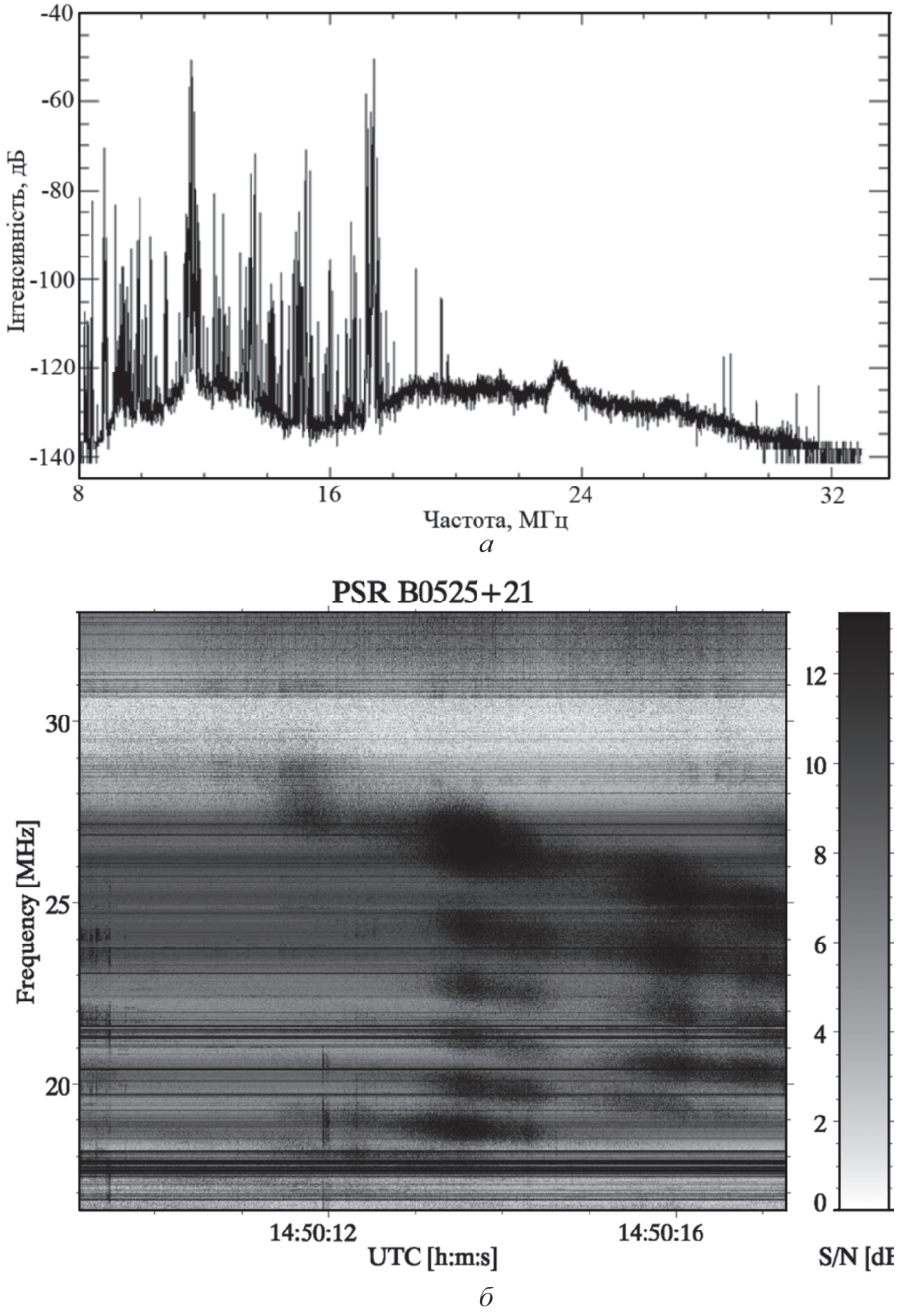
Як бачимо, проблемою, що об'єднує дослідження спорадичного і транзієнтного радіовипромінювання космічних джерел, є придушення найрізноманітніших завад. Найчастіше виконання рутинних операцій очищення від завад залишає надзвичайно багато місця для сумнівів, тому слід використовувати якомога ширший набір критеріїв розрізнення космічних сигналів і широкого розмаїття імпульсів земного походження.

3. Методи очищення записів спостережень спорадичних сигналів від завад

Алгоритми та методи обробки записів спостережень згаданих вище джерел космічного радіовипромінювання мають багато спільного. Для спорадичного, а особливо транзієнтного, радіовипромінювання такий критерій виявлення космічних радіоджерел, як повторюваність результатів спостережень, є непридатним. Доводиться спиратися на одиничні спостереження й використовувати для їх верифікації всі можливі додаткові критерії. Цьому надзвичайно сильно заважають численні та різноманітні як штучні, так і природні радіозавади, а також вплив іоносфери та міжпланетного середовища на поширення космічних радіосигналів. Верхня панель рис. 6 ілюструє високий рівень завад ($60 \div 80$ дБ над фоном) під час денних спостережень, а нижня – складну картину мерехтінь потужного континуального джерела, яке потрапляє до діаграми спрямованості радіотелескопа УТР-2 під час спостережень пульсара B0525+21 (інтенсивність завадових сигналів перевищує фон на $10 \div 12$ дБ).

У випадку континуального чи повторюваного імпульсного випромінювання дуже ефективним є накопичення сигналів. Надійним методом виявлення є діаграмна модуляція або використання двопроменевого режиму спостережень (режим "ON–OFF"). При густині потоку шуканого сигналу нижче рівня шуму ефективними є процедури, що усувають всі інтенсивні сигнали (які в цьому разі за замовчуванням вважаються завадами).

Ми виділяємо окремий розділ у статті для огляду розроблених авторами загальних і специфічних процедур очищення даних від завад, оскільки це – один із найважливіших етапів роботи і, в більшості випадків, успіх астрофізичного дослідження спорадичного радіовипромінювання безпосередньо залежить від якості роботи зга-



а

б

Рис. 6. Ілюстрація високого рівня штучних та природних радіозавад: *а* – сигнали широкомовних радіостанцій у мільйони разів перевищують рівень випромінювання Юпітера, максимум якого на даному рисунку розташовано у смузі $23 \div 24$ МГц та в десятки мільйонів разів є вищими за фон; *б* – рівень мерехтінь потужного континуального джерела на неоднорідностях іоносфери під час спостережень пульсара перевищує рівень фону на 12 дБ [38]

даних процедур. Щодо очищення від завад даних спостережень описуваних у цій роботі космічних джерел, послідовність викладу буде відповідати зростанню складності виділення космічних сигналів на фоні радіозавад. Оскільки для блискавок у атмосфері Сатурна та нейтронних зір очікувані параметри (широкосмуговість, інтенсивність, тривалість, дисперсійна затримка) добре відомі, то й методи очищення від завад досить прості. Найбільші труднощі для автоматизованого очищення від завад викликають записи радіовипромінювання Юпітера (S-сплески), оскільки вони мають надзвичайно широкий інтервал варіацій багатьох параметрів випромінювання.

3.1. Виділення сигналів блискавок на фоні завад

Як вже зазначалося вище, слабкі джерела космічного радіовипромінювання можна виявити за допомогою накопичення. У разі спорадичного радіовипромінювання блискавок у атмосфері Сатурна (коли час існування сигналу складає кілька десятків мілісекунд, але сигнал є досить широкосмуговим) ефективним є накопичення за частотою. Інтенсивні сигнали вузькосмугових завад придушує алгоритм, описаний у роботі [39]:

1) повторюване відкидання відліків, що перевищують значення 3σ (σ – середньоквадратичне відхилення) в кожному вузькосмуговому (4 кГц) каналі, і після того, як таких не лишається, виконується обчислення середнього значення запису й σ за відліками, що лишилися для кожного каналу;

2) відкидання та заміна на середнє значення або обмеження сплесків, що лишилися, з використанням заздалегідь визначеного порогу.

Ця двоетапна процедура втілена в утиліті PATROL [40], яка застосовується у разі очищення даних спостережень різноманітних космічних джерел (наприклад, пульсарів) від завад.

При обробці сигналів блискавок додається наступний крок:

3) накопичення широкосмугових сигналів за частотою в кількох парціальних каналах шириною $0.5 \div 1$ МГц із подальшою перевіркою наявності сигналів у кількох парціальних каналах [39].

Приклад такого аналізу наведено на рис. 7.

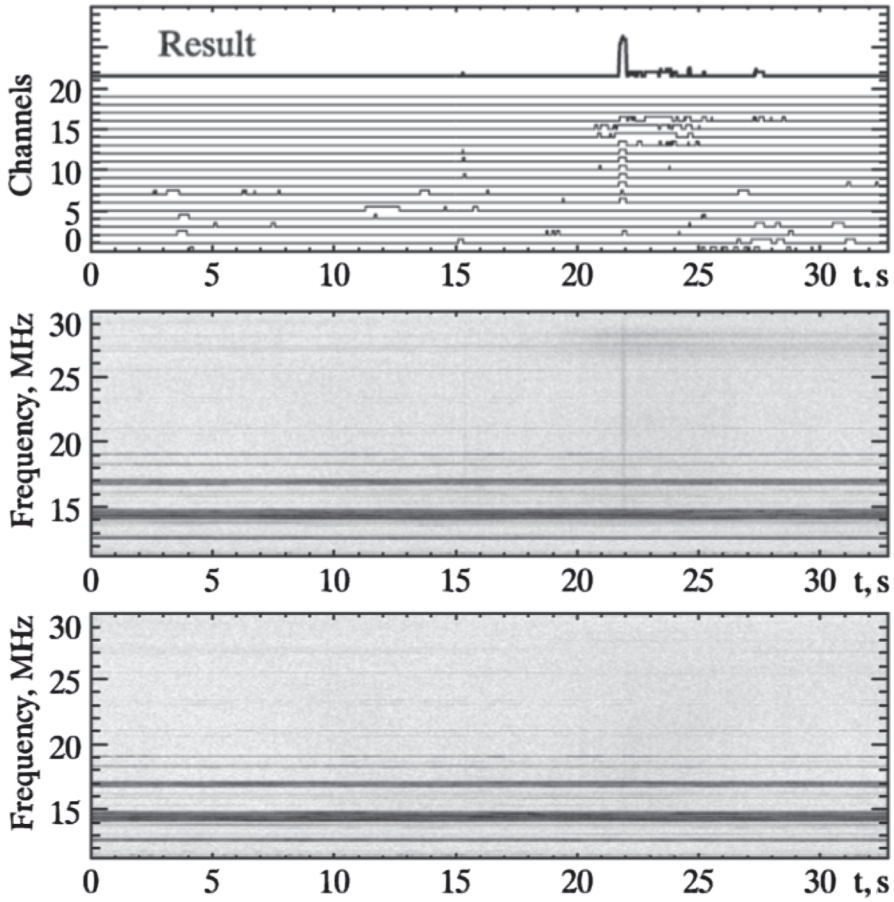


Рис. 7. Приклад детектування блискавок у атмосфері Сатурна [10]: середня панель – канал ON; нижня панель – канал OFF; верхня панель – їх різниця, причому 5120 частотних каналів по 4.03 кГц зібрано у 20 субсмугах по 1.031 МГц. Перевищення порогу детектування відображено підйомом сигналу в парціальному каналі. Кількість каналів, де одночасно відбулось перевищення порогу, відображено на верхній кривій "Result"

Під час спостережень шторму J (рис. 8) завдяки наявності записів waveform із часовою роздільною здатністю 15 нс можна було розвинути процедуру виділення блискавок.

На мікросекундному масштабі чітко видно дисперсійну часову затримку сигналу, яка зростає зі зменшенням частоти, внаслідок проходження сигналу через космічну плазму. Широкосмугові завади не мають такої затримки, тому вони можуть бути відфільтровані за допомогою врахування цієї властивості космічних сигналів, про що йтиметься в наступному розділі.

Під час обробки сигналів блискавок на мікросекундному масштабі спершу виконувалась компенсація дисперсійної затримки. Для подальшого автоматичного детектування сигналів SED у даних із високою часовою роздільною здатністю великої кількості подій знадобилася модифікація цієї методики. Перший етап було спрямовано на жорстке "відсіювання" завад. Тому попереднім критерієм було обрано перевищення значення 4σ не менше ніж у чотирьох каналах у разі розбиття всього діапазону ($16.5 \div 33$ МГц) на 32 канали. Застосування виключно цього критерію дає змогу детектувати лише найпотужніші піки внутрішньої структури блискавки. Для коректнішої оцінки тривалості елементів тонкої структури застосовувалася та сама методика з менш жорстким критерієм – 3σ у двох каналах в області, яка попередньо була обмежена на минулому етапі.

3.2. Багатопараметричний пошук транзієнтних сигналів

Для пошуку одиночних сплесків (транзієнтних сигналів) на тлі завад слід використовувати якомога більше критеріїв, які дозволяють виявити космічні джерела імпульсного радіовипромінювання. Передусім, завдяки дисперсійній затримці в міжзоряному та міжпланетному середовищі (для близьких джерел також має значення дисперсійна затримка в іоносфері), широкосмугові космічні сигнали мають запізнення низьких частот щодо високих обернено пропорційно ква-

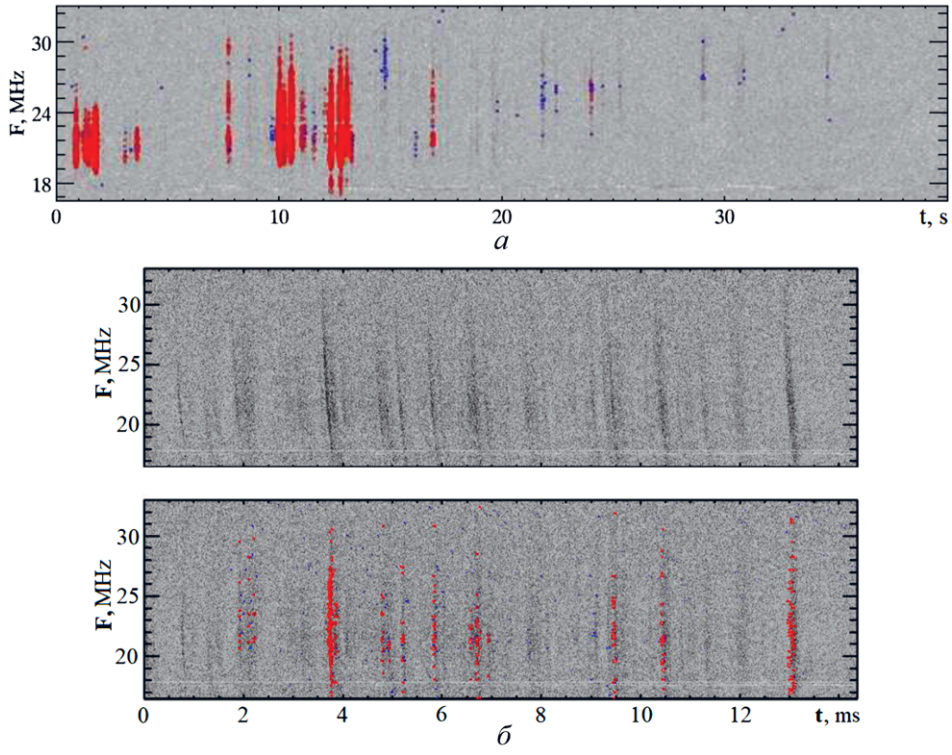


Рис. 8. Детектування блискавок: *а* – динамічні спектри в даних із часовою роздільною здатністю 10 мс, *б* – динамічні спектри в даних із часовою роздільною здатністю 8 мкс (верхня панель) та вони ж після усунення дисперсійної затримки (нижня панель). Розташованими вертикально колами з діаметром, пропорційним відношенню С/Ш, позначено відліки, де поріг було перевищено одночасно в кількох каналах із сумарною смугою понад 2 МГц

драту частоти (f^{-2}). В декаметровому діапазоні часова затримка між частотами 30 і 10 МГц становить від десятків мікросекунд для блискавок та інших широкосмугових сигналів від планет Сонячної системи до десятків, сотень і більше секунд – для близьких пульсарів або RRAT.

Наступним важливим критерієм є рівень сигналу від космічного джерела, який має невелике перевищення інтенсивності над фоном (за винятком сигналів від Юпітера та Сонця), а найчастіше є набагато нижчим за нього. Співвідношення сигнал/шум (С/Ш) може становити від одиниць до кількох десятків. Іншою характерною ознакою космічного сигналу є наявність розсіяння, а також зростання сталої часу розсіяння зі зниженням частоти. Однак зафіксувати цей факт вдається тільки в тому випадку, якщо сигнал має достатню інтенсивність.

При пошуку транзієнтних або рідкісних (як у RRAT) сигналів першим етапом виділення космічного імпульсу на тлі радіозавад є розвиток методу PATROL (див. попередній підпункт) за допомогою адаптованого для низькочастотних спостережень методу Sum Threshold [41], втіленого в утиліті ADR_CLEANING [40, 42]. Суть методу полягає в застосуванні ковзних вікон. Для кожного частотного та часового каналу розраховуються середнє значення та σ за утилітою PATROL (див. підпункт 3.1), але процес усунення сигналів, які вважаються завадами, залежить у кожному вікні від встановленого порогового значення. Формально це представлено в нижченаведених пунктах:

1) формування ковзних вікон HORIZONTAL із шириною $M = 1,\ 2,\ 4,\ 8,\ 64$ відліків і VERTICAL із шириною $M = 2,\ 8,\ 16,\ 128,\ 256$ відліків і значеннями порогів, що визначаються як логарифм від ширини вікна з емпірично підібраними нормуючими коефіцієнтами, наприклад, для VERTICAL – 6.67σ, 2.96σ, 1.98σ, 0.59σ, 0.4σ;

2) обчислення середнього значення і σ за утилітою PATROL (див. підпункт 3.1), заміна відліків з перевищенням відповідних порогів середнім значенням;

3) повторення для всіх ковзних вікон від короткого до довгого.

Приклад очищення – послідовно отримувані результати очищення та маска "поганих" пікселів, які замінені на середнє значення, – наведено на рис. 9 [40].

Наступним кроком є усунення дисперсійного запізнення, яке можна проілюструвати на прикладі записів сигналів пульсара B0809+74 на рис. 10 [43]. Сигнали пульсара (панель *a*) після

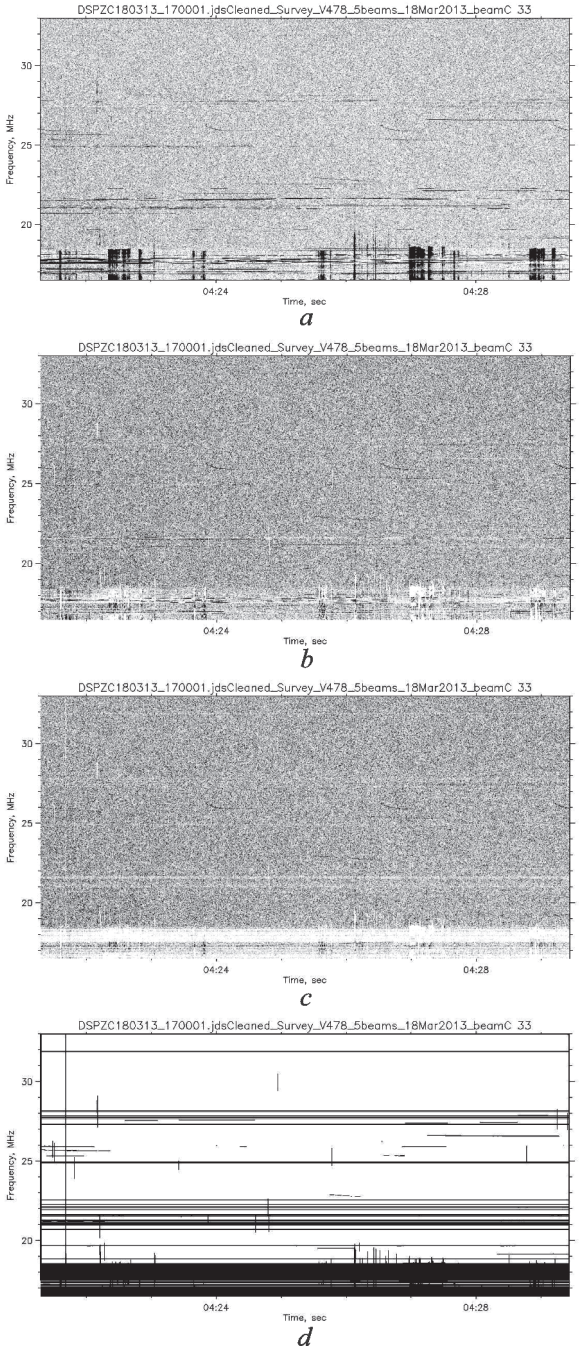


Рис. 9. Послідовні стадії роботи процедури очищення: *a* – вихідні дані, *b* – дані після роботи процедури ADR_CLEANING, *c* – дані після роботи процедури PATROL, *d* – маска

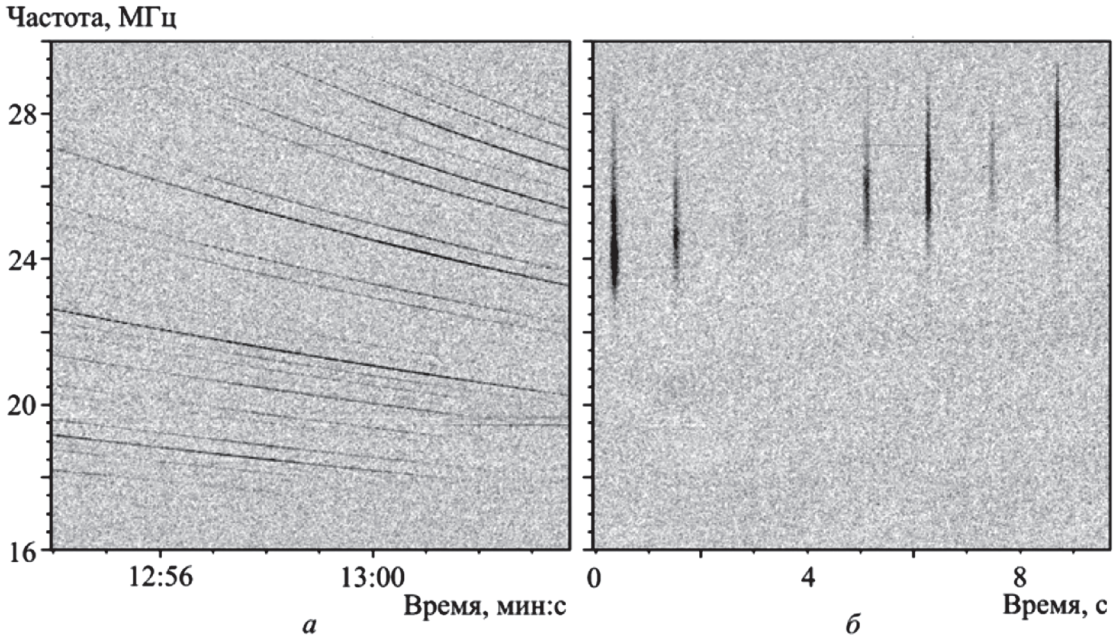


Рис. 10. Ілюстрація роботи процедури усунення дисперсійного запізнення (операції дедиспергування) при обробці даних спостережень пульсара B0809+74: *а* – дані після процедури очищення від завад, *б* – результати усунення дисперсійної затримки [43]

дедиспергування (компенсації часової затримки, що пропорційна f^{-2}) стають строго вертикальними (панель *б*).

Для одиночних сигналів (період повторення відсутній) надзвичайно важливим є багатопараметричний аналіз даних [44]. На рис. 11 представлено результат детектування одиночного транзієнтного сигналу з мірою дисперсії 3.67 пк·см$^{-3}$. Справа вгорі розміщено спектрограму дедиспергованого імпульсу. Ліворуч від неї наведено співвідношення С/Ш у накопичених за частотою 128 спектральних каналах (спочатку записи містять 4096 спектральних каналів). Внизу представлено профіль сигналу в чотирьох частотних смугах і в усій смузі. Підсумкове співвідношення С/Ш становить близько 12, а густина потоку цього сигналу в максимумі близька до 60 Ян.

Завади з інакшою залежністю, що відрізняється від f^{-2}, після дедиспергування мають на площині "міра дисперсії – час" розтягнутий відгук за віссю ординат (DM), як показано на верхній панелі рис. 12. При багатопараметричному аналізі такі завади видаляються зі списку "кандидатів" [45].

При мірі дисперсії, яка відповідає максимуму, сигнал виглядає викривленим, що не схоже на сигнали пульсарів (див. рис. 7), тому такі сигнали не є широкосмуговими сплесками космічного походження.

Отже, розроблені процедури очищення від радіозавад і багатопараметричний аналіз сигналів дозволяє досить надійно відокремлювати космічні широкосмугові сигнали від завад земного походження.

3.3. Процедури очищення записів спостережень радіовипромінювання Юпітера

Основні труднощі обробки сигналів Юпітера пов'язані з наявністю структур із істотно різними часовими і частотними масштабами в динамічних спектрах (із мультимасштабністю). Завадові сигнали також мають нестаціонарний характер на частотно-часовій площині, хоча найчастіше досвідчений спостерігач може досить легко розрізнити сигнали природного та штучного походження при візуальному аналізі спектрограм. Слід, однак, відзначити, що навіть досвідчений спостерігач може бути введений в оману за наявності завад, які важко відрізнити від корисного сигналу.

На рис. 13 наведено приклад усунення завад у ділянці запису Io-B шторму, коли короткі імпульси S-сплесків, що характеризуються негативним частотним дрейфом, супроводжуються завадою,

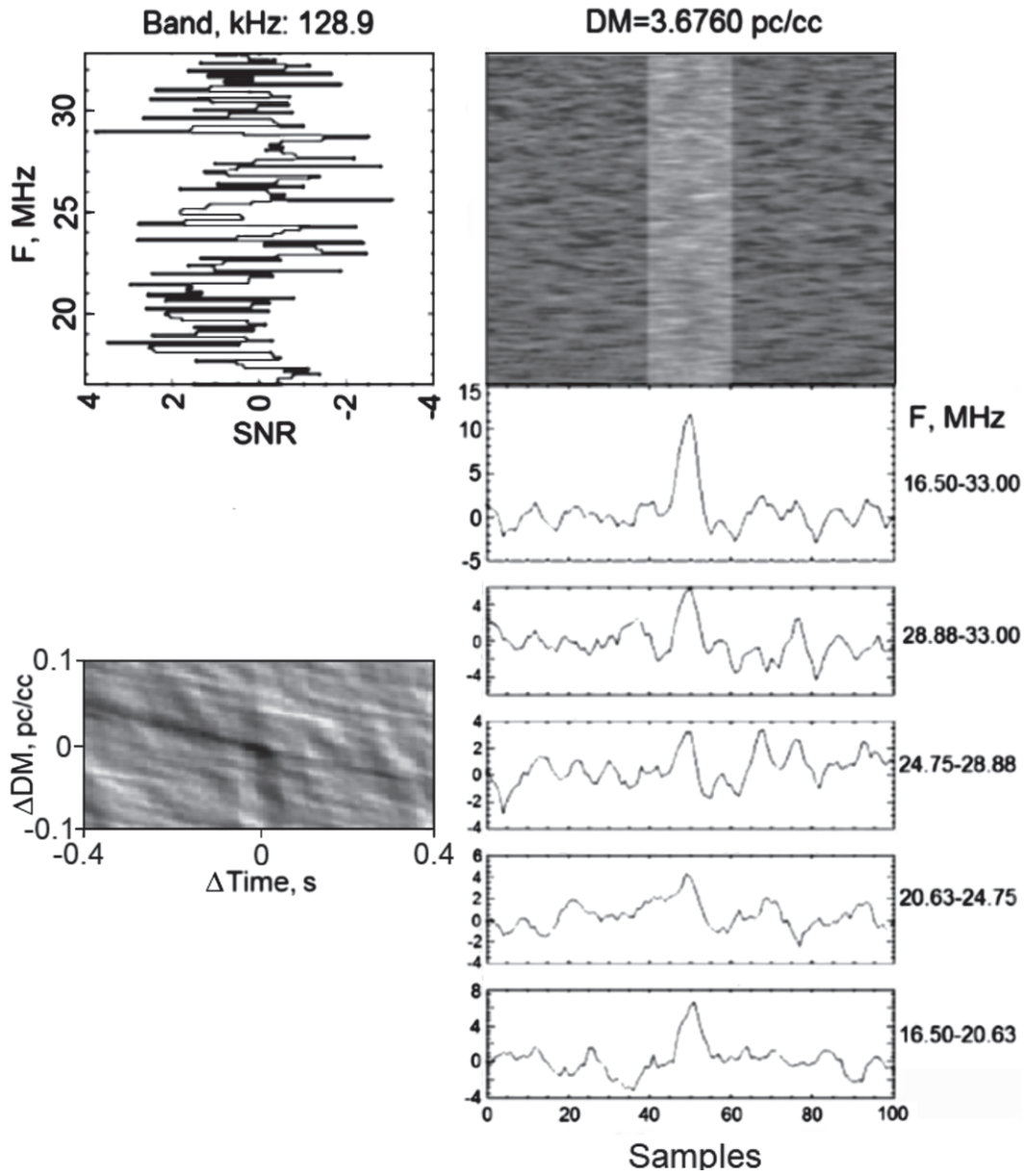


Рис. 11. Детектування космічного сигналу з мірою дисперсії 3.676 пк·см$^{-3}$: справа вгорі – динамічні спектри; зліва вгорі – динамічні спектри, усереднені за частотою; справа внизу – динамічні спектри, усереднені за часом (5 панелей із позначенням біля кожної межі частотної смуги, в якої виконувалося накопичення); зліва внизу – панель "міра дисперсії – час", де максимум сигналу займає малий інтервал за DM, що свідчить про дуже точну відповідність дисперсійної затримки даного сигналу закону дисперсії в холодній космічній плазмі (f^{-2}) [44]

що складається зі схожих імпульсів, але з позитивним частотним дрейфом. Рис. 13, *а* представляє динамічний діапазон без обробки, рис. 13, *б* містить той самий сигнал, але після видалення вузькосмугових завад. Сигнали як із позитивним, так і з негативним дрейфом не виявляються програмою видалення завад, що цілком природно, тому що алгоритм не налаштований на пошук сигналів із швидким частотним дрейфом. Цікаво відзначити, що спостережувана швидкість дрейфу імпульсів має приблизно однакове значення для сигналів Юпітера і для завади невідомого походження, але має різний знак. При цьому період слідування, смуга частот і тривалість цих імпульсів подібні, тобто легко припустити, що обидва сигнали можуть бути породжені схожими фізичними процесами. Однак ціла низка інших характеристик випромінювання, отриманих при за-

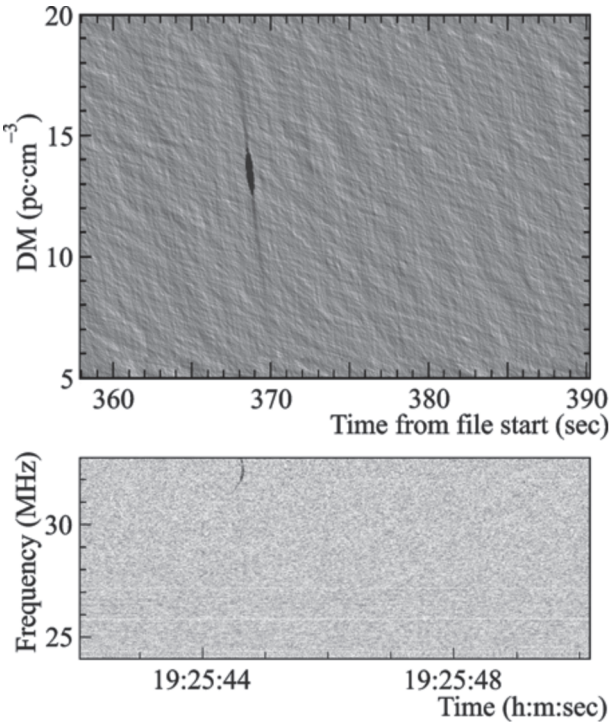


Рис. 12. Хибно-позитивне детектування в результаті роботи конвеєра обробки даних (верхня панель); сигнал після дедиспергування з мірою дисперсії, яка відповідає центру відгуку, (нижня панель) [45]

стосуванні операцій розтягування і стиснення як за часом, так і за частотою, наочно свідчить про штучну природу імпульсів із позитивним частотним дрейфом.

Багаторічна практика аналізу динамічних спектрів показує, що у складних випадках фрагмент запису слід піддати аналізу "розтягування–стиснення" (zoom in/out), що дозволяє виділити характерні особливості юпітеріанського випромінювання та відрізнити його від сигналів штучного походження. Такий аналіз вимагає розробки кількох істотно різних алгоритмів, призначених для ідентифікації завад під час аналізу спектрограм, що мають різну частотно-часову роздільну здатність.

Завади, що зустрічаються найчастіше, мають імпульсний широкосмуговий (вертикальні лінії на динамічному спектрі) або вузькосмуговий (горизонтальні лінії) характер, що дозволяє досить ефективно визначати частотні канали та/або моменти часу, зайняті завадою, та вилучати їх із подальшого аналізу. Для цього найчастіше використовуються ітеративні статистичні процедури, що ґрунтуються на встановленні порогових значень, виражених в одиницях, що визначені статистичними моментами (середнє, медіана, дисперсія тощо). Основною складністю тут є правильне встановлення порогових значень, тому що за наявності великої кількості вузькосмугових сигналів різної інтенсивності (а також імпульсних сигналів різної тривалості) неможливо вибрати універсальні порогові значення, які були б однаково ефективними як у ситуації порівняно вільних від завад спостережних сесій, так і при поганій завадовій обстановці. Крім того, проблема встановлення порогів для ідентифікації завад часто залежить від часових і частотних інтервалів, на яких оцінюються статистичні моменти. Це свідчить про необхідність створення досить гнучких алгоритмів, що дозволяють виконувати різне оцінювання порогів при зміні частотного та часового масштабу аналізованих спектрограм. Необхідною виявляється також розробка спеціалізованих підходів до оцінки ефективності застосовуваних методів, щоб уникнути ситуацій, коли корисний сигнал ідентифікується як завада. Для цього слід здійснювати статистичний аналіз на кожному етапі ітеративних процедур із введенням додаткових параметрів, що визначають ефективність роботи алгоритмів.

4. Результати досліджень космічних джерел спорадичних і транзієнтних сигналів на УТР-2

4.1. Тонка структура блискавок у атмосфері Сатурна

Результатом досліджень на УТР-2 блискавок в атмосфері Сатурна стало відкриття мікроструктури цих сигналів. За умови високої часової роздільної здатності апаратури (мікросекунди) найбільш інтенсивні блискавки можливо виділяти на тлі завад завдяки дисперсійній затримці в міжпланетній плазмі. Це дає змогу ідентифікувати ці сигнали без використання додаткових критеріїв. На рис. 14 представлено результати детектування блискавок під час шторму J за допомогою waveform-запису даних приймачем DSPZ на УТР-2. На рисунку наведено тільки фрагмент блискавки тривалістю кілька десятків мілісекунд, який складається з багатьох набагато коротших сплесків ($30 \div 300$ мкс). Вони показані в мілісекундному (верхня панель) та мікросе-

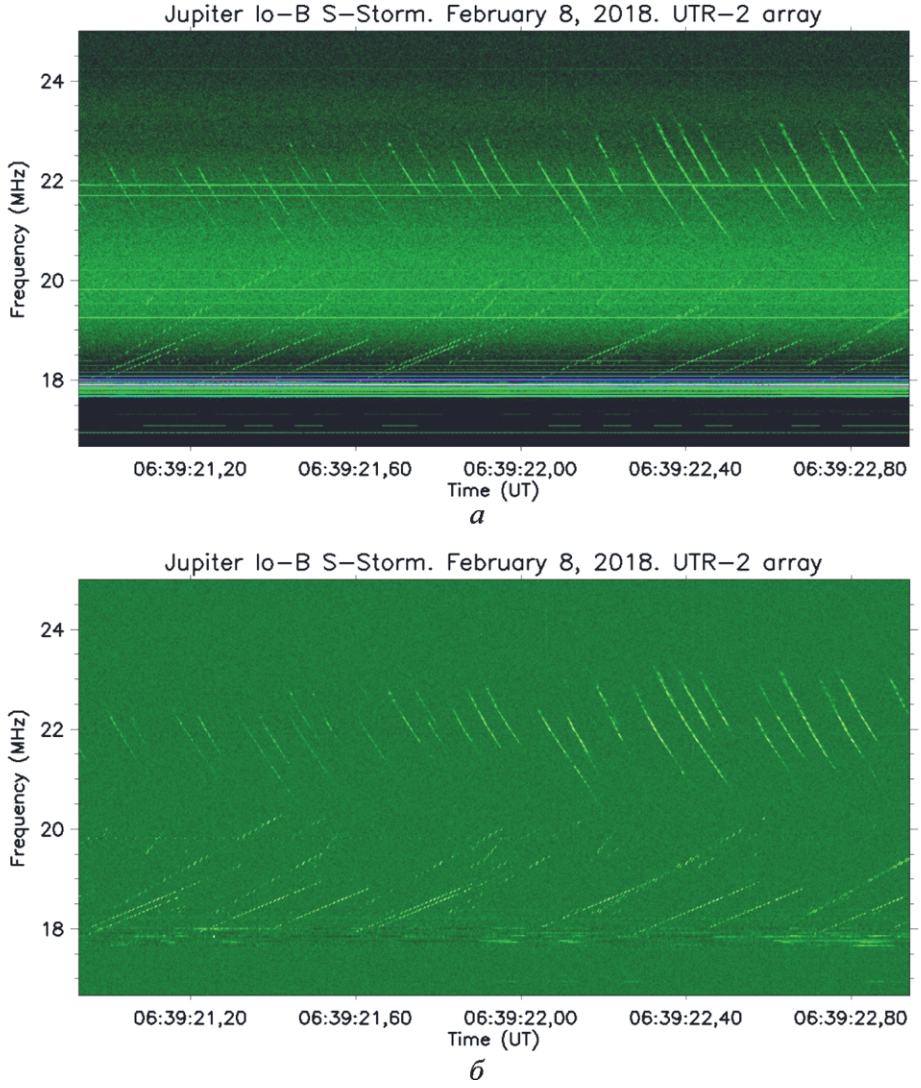


Рис. 13. S-сплески Юпітера з негативним частотним дрейфом (верхня половина спектру) і сигнали штучного походження з позитивним частотним дрейфом (нижня половина спектру) до (*а*) і після (*б*) застосування процедур видалення завад. Програма видалення завад не розпізнає імпульси в нижній частині спектра як завади

кундному (середня панель) масштабах часової шкали. Слід зазначити, що тривалості сплесків мікросекундної структури розрядів в атмосфері Сатурна в десятки разів менші за тривалості сплесків у земних блискавок.

Всі результати спостережень було занесено до бази даних із часовою роздільною здатністю 10 мс. Цей каталог блискавок із невеликою роздільною здатністю використовувався для пошуку найпотужніших розрядів, які мали б достатнє співвідношення С/Ш для аналізу даних із високою часовою роздільною здатністю. Каталог "швидких даних", який називається "Каталог електростатичних розрядів" (Electrostatic discharge (ED) catalogue, URL: http://rian.kharkov.ua/decameter/EDC/), містить короткі файли метаданих із основною інформацією про спостереження та файл із високою часовою роздільною здатністю (15 нс). Файли метаданих містять кількість частотних каналів, у яких було знайдено перевищення порогу детектування, та значення порогу, значення співвідношення С/Ш, час події та значення міри дисперсії.

Наступний аналіз цих даних виявив не тільки індивідуальні характеристики SED, але і статистичні. Окрім часових характеристик сигналів, було проаналізовано міру дисперсії. Точне визначення значення DM було зроблено в межах

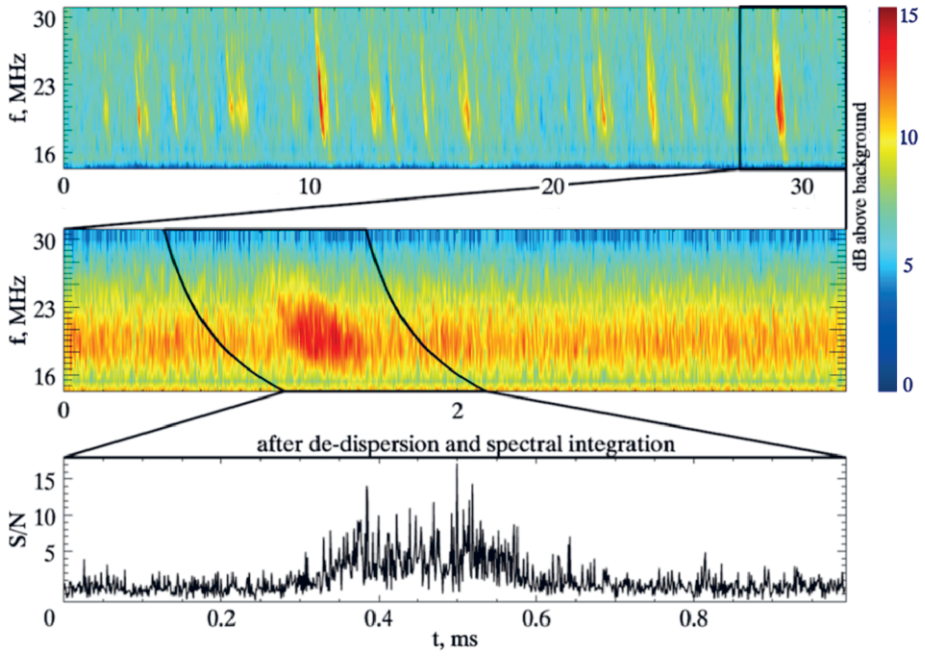


Рис. 14. Спостереження радіовипромінювання блискавок в атмосфері Сатурна в режимі waveform 23 грудня 2010 р.: верхня панель – мілісекундний масштаб часу, середня – мікросекундний (виділено інтервал часу $27.5 \div 31.5$ мс), нижня панель – результат накопичення за частотою після операції усунення дисперсійної затримки [5]

$\pm 10^{-5}$ пк·см$^{-3}$ із кроком $3 \cdot 10^{-8}$ пк·см$^{-3}$. Для спостережень 21–26 грудня 2010 р. середнє значення DM становило $(4.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$ пк·см$^{-3}$ [46].

Для пошуку найкоротших часових структур SED було обрано найпотужніші події та побудовано їх часові профілі з часовою роздільною здатністю $\Delta t \approx 500$ нс (32 частотних канали). Приклад такої ділянки запису блискавки представлено на рис. 15. За такої часової роздільної здатності видно найтонкішу структуру сигналу, який складається з коротких (тривалістю кілька відліків) піків. Піків сигналів, після яких інтенсивність падає більш ніж у e разів (тобто для яких роздільної здатності 500 нс не вистачило), знайдено не було. Тепер можна оцінити пікове значення густини потоку випромінювання блискавки. Для найпотужніших подій воно знаходиться в діапазоні $4000 \div 5000$ Ян. Слід сказати, що це значення лише в кілька разів перевищує густину потоку, визначену при $\Delta t = 20$ мс для гігантського шторму J ($1500 \div 2000$ Ян) і густину потоку максимально інтенсивних спалахів шторму E (700 Ян) [6]. Отже, протягом усіх спостережених штормів відбувалися потужні спалахи, в яких співвідношення С/Ш було достатнім для детектування та вивчення тонкої структури SED.

4.2. Результати спостережень радіовипромінювання Юпітера з високою чутливістю і часовою та частотною роздільними здатностями

Спостереження S-бур Юпітера у 2004–2008 рр. часто проводилися в режимі waveform, що дозволило значно краще дослідити тонку частотно-часову структуру мілісекундних імпульсів і зробити їх класифікацію, розділивши ці сигнали на групи, які генеруються, можливо, істотно різними фізичними процесами. У статті [47] було виконано детальний аналіз мультимасштабних структур у динамічних спектрах декількох Io-A та Io-B радіобур Юпітера зі зняттям практично всіх обмежень, пов'язаних із роздільною здатністю. Оскільки починаючи з 2008 р. запис у режимі waveform міг виконуватися безперервно протягом кількох годин, було отримано деталізовані спектрограми практично всіх процесів, що відбуваються в джерелі випромінювання під час сеансів спостережень. Хоча основний акцент було зроблено на класифікації S-сплесків, частий збіг S- і L-випромінювання за часом і частотою (а також наявність тонкої структури в динамічних спектрах L-випромінювання) приводить до гіпотези про можливу

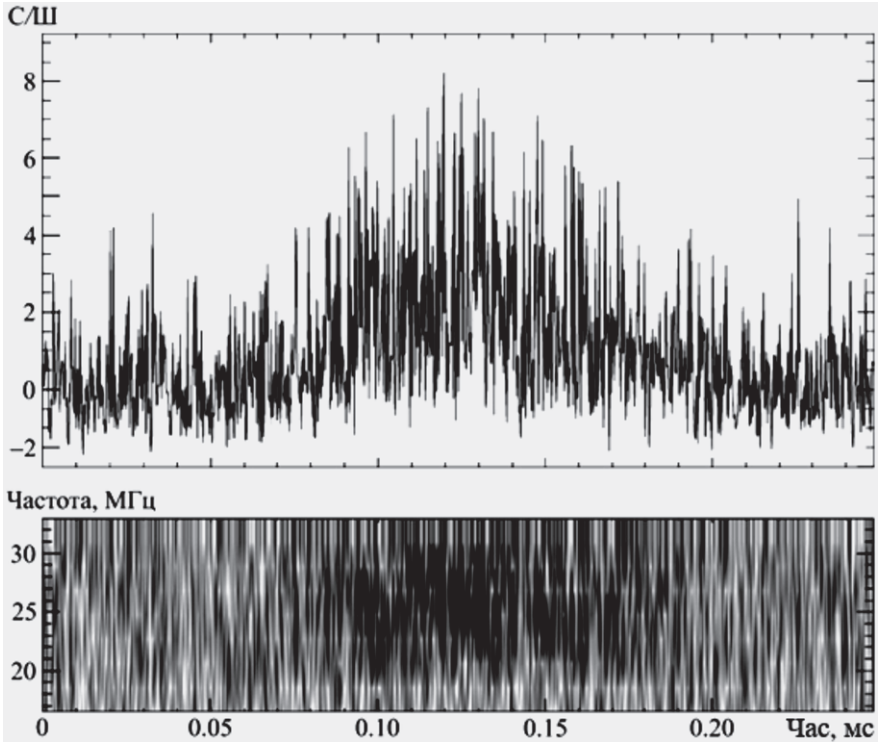


Рис. 15. Профіль сигналу (верхня панель) і спектрограма з часовою роздільною здатністю 500 нс (нижня панель) [6]

близькість основного механізму генерації радіохвиль у джерелах обох типів. На рис. 16 наведено приклад співіснування мілісекундних вузькосмугових S-імпульсів, дрейфуючих за частотою, із широкосмуговим випромінюванням типу L. Цікаво, що L-випромінювання також виявляється фрагментованим на частотно-дрейфуючі структури, що стає очевидним лише при збільшенні частотно-часової роздільної здатності. Рис. 17 ілюструє одночасне співіснування S-сплесків складнішої форми з випромінюванням типу N, яке при вищій роздільній здатності виявляється подібним L-випромінюванню, наведеному на рис. 16, проте генерується в досить вузькій смузі частот. Подібність частотно-часової структури N- і L-випромінювання, що свідчить про можливу подібність фізичного механізму N- і L-випромінювання, стає помітною при підвищенні роздільної здатності (див. рис. 18). Насамкінець зазначимо, що різноманітність частотно-часових структур під час спостереження декаметрових радіобур може бути зумовлена як зміною фізичних параметрів у джерелі, так і геометричними ефектами, пов'язаними з розташуванням джерела відносно спостерігача.

4.3. Відкриття нових джерел транзієнтного радіовипромінювання

У 2011–2018 рр. на радіотелескопі УТР-2 було проведено перший повний "сліпий" огляд Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання декаметрових хвиль [42, 44, 45, 48–52]. Діапазон досліджуваних схилень δ лежав у межах від $-10°$ до $90°$. Спостереження проводилися за рахунок обертання Землі в режимі "drift–scan", коли антена направлена в меридіан на певному значенні схилення δ, п'ятьма променями, що забезпечувало одночасно більше покриття та, що дуже важливо, режим "ON–OFF". Часова роздільна здатність складала 8 мс, що менше за сталу часу розсіяння більшості близьких пульсарів, частотний діапазон – $16.5 \div 33$ МГц, де рівень завад є значно меншим, ніж у нижній частині декаметрового діапазону. За допомогою двох програмних конвеєрів здійснювалась обробка спостережних даних (близько 100 Тб), а саме:

– пошук інтенсивних індивідуальних імпульсів – "кандидатів", який включає очищення від радіочастотних завад, компенсацію впливу дисперсійної затримки та виділення піків випромінювання, значення яких перевищують 5.5σ;

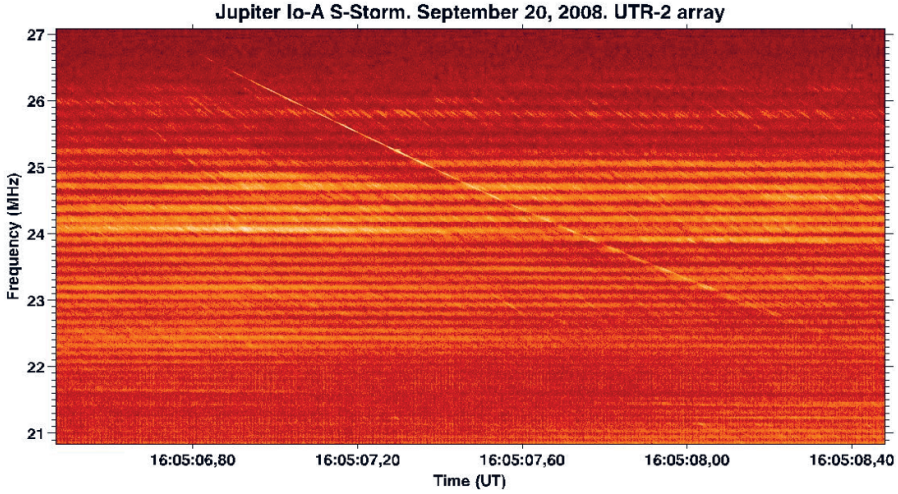


Рис. 16. Частотно-дрейфуючий вузькосмуговий імпульс, що дрейфує поперек смуги, зайнятої L-випромінюванням. Структура L-випромінювання виявляється фрагментованою на частотно-дрейфуючі імпульси, що особливо помітно у високочастотній частині спектру в діапазоні від 25.5 до 26.5 МГц. Горизонтальні лінії модуляції зумовлені реакцією лінійно поляризованого диполя УТР-2 на фарадеївське обертання площини поляризації випромінювання при поширенні радіохвиль у плазмі

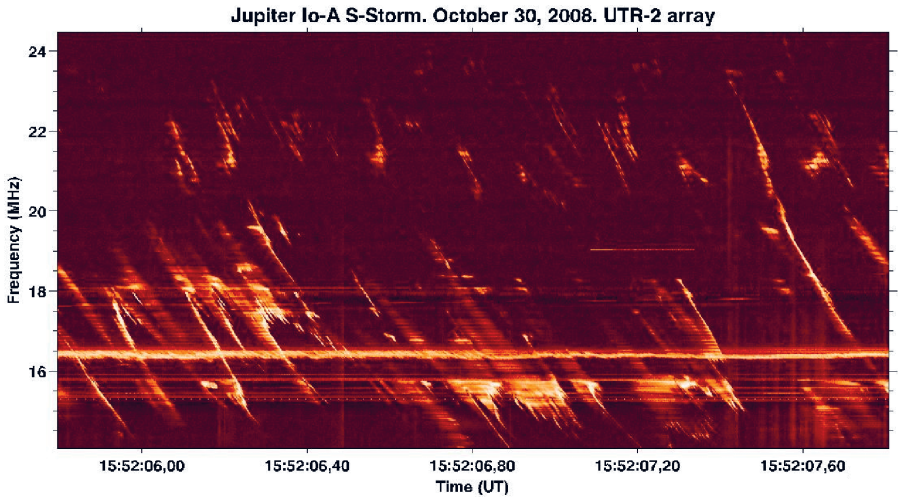


Рис. 17. Одночасне існування S-сплесків складної структури та N-випромінювання. Порівняно вузьку смугу N-випромінювання добре видно поблизу частоти 16.5 МГц. S-сплески вільно перетинають область частот, що відповідає N-випромінюванню, без видимих змін у частотно-часовій структурі [47]

– багатопараметрична обробка індивідуальних сигналів із візуальним контролем декількох характеристик "кандидатів" – дисперсійної затримки, широкосмуговості, наявності низькоінтенсивних завад тощо.

Було висловлено припущення, що серед "кандидатів" могла лишитися певна кількість завад, породжених мерехтінням радіовипромінювання континуальних джерел на неоднорідностях іоносфери. Для перевірки цієї гіпотези спостережні дані було інвертовано в часі й оброблено, як звичайні (тобто здійснювався пошук ймовірних сигналів зі "зворотною" мірою дисперсії, часова затримка яких пропорційна не f^{-2}, а $-f^{-2}$) [50]. Обробка таким методом дозволила виявити сигнали, які мали характеристики, що відрізняються від виявлених "кандидатів" (зокрема, набагато меншу широкосмуговість), і співвідношення С/Ш жодного з них не перевищувало значення 7.2. Значення міри дисперсії цих сигналів не співпадають зі значеннями міри дисперсії відомих пульсарів або RRAT, а також відрізняються для

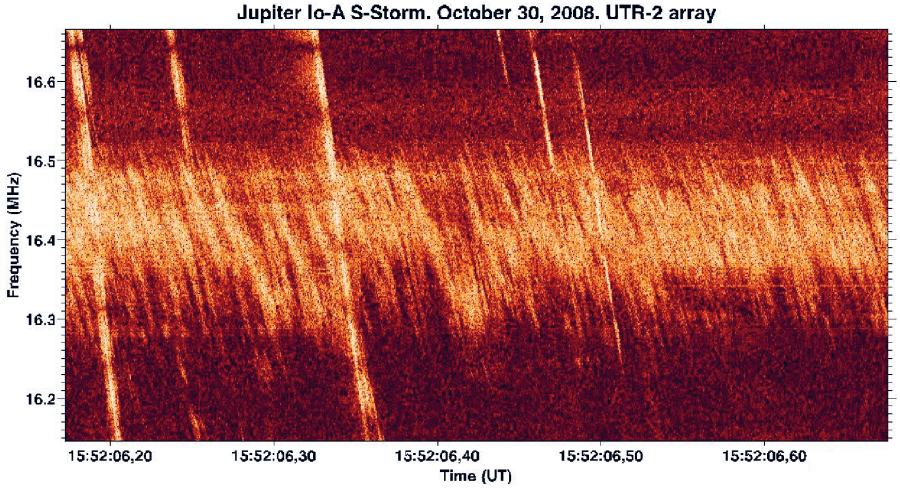


Рис. 18. Перетин частотно-дрейфуючими S-сплесками смуги генерації N-випромінювання (збільшений фрагмент спектрограми, наведеної на рис. 17). Добре помітно розщеплення суцільної смуги випромінювання, наведеної на рис. 17, на велику кількість коротких імпульсів із повільнішим (порівняно з S-сплесками) частотним дрейфом [47]

всіх 380 сигналів. Для усунення сумнівів і щодо таких випадків детектування з переліку "кандидатів" було вилучено всі імпульси, що мають співвідношення С/Ш менше 8. Результатом стало виявлення 380 сигналів (рис. 19), які автори вважають імпульсами космічного походження [52].

Ці висновки підтверджуються розподілом цих 380 імпульсів за різними параметрами, такими як час появи, співвідношення С/Ш, міра дисперсії [50, 52].

Крім того, порівняння розподілу за галактичною широтою 380 імпульсів з аналогічним розподілом для 98 відомих близьких пульсарів ($\mathrm{DM} < 30$ пк·см$^{-3}$ та періоди $P > 0.2$ с) показало (рис. 20) їх якісну подібність [52].

Зростання кількості нових телескопів і якості апаратури приводить до більшого числа відкритих пульсарів. За останні 10 років кількість близьких пульсарів ($\mathrm{DM} < 30$ пк·см$^{-3}$, $P > 100$ мс), доступних для спостережень на УТР-2, збільшилась удвічі (у 2010 р. їх було близько 80, на початку 2020 р. – 163 [53–55]). Додаткове збільшення потенційно доступних для детектування на низьких частотах пульсарів пов'язано з тим, що конус їх випромінювання розширюється приблизно вдвічі у разі спостережень на відносно близької до 25 МГц частоти 100 МГц [38] і в 4–5 разів – порівняно зі спостереженнями на частоті 1.4 ГГц. Отже, як транзієнтні можуть бути продетектовані аномально інтенсивні імпульси [33, 35] невідомих пульсарів із періодами близько секунди та гігантські імпульси мілісекундних пульсарів після розсіяння в міжзоряному середовищі [56–58].

Незважаючи на те, що зараз відомо трохи більше ста RRAT [59], одним із результатів популяційного синтезу в астрофізиці є висновок, що таких залишків наднових існує в кілька разів більше, ніж пульсарів [60]. Можливо, частина продетектованих у огляді сигналів належить саме RRAT.

Іншими типами об'єктів, що потенційно доступні для спостережень у низькочастотному діапазоні, є одиночні радіотихі рентгенівські нейтронні зорі [61–63], пульсари із крутими спектральними індексами (близько –3), електростатичні розряди у викидах вулканів близьких екзопланет [64], а також певні земні та космічні джерела невідомої природи.

З огляду на сказане, при повторних спостереженнях можна очікувати виявлення повторюваності певних сигналів та детектування нових джерел. Результатом проведених досліджень [65] стало детектування повторних сигналів від кількох джерел спорадичного декаметрового радіовипромінювання. Зокрема, було виявлено повторні імпульси (рис. 21) від джерела J0337+3937. Значення міри дисперсії сигналу, продетектованого у 2016 р., складало (7.03 ± 0.05) пк·см$^{-3}$, DM двох повторних імпульсів від цього радіоджерела, виявлених восени 2019 р., – (7.02 ± 0.05) і (6.942 ± 0.05) пк·см$^{-3}$. Повторюваність сигналів від іще кількох джерел наразі перевіряється – виконується додаткова обробка й аналіз спостережних даних.

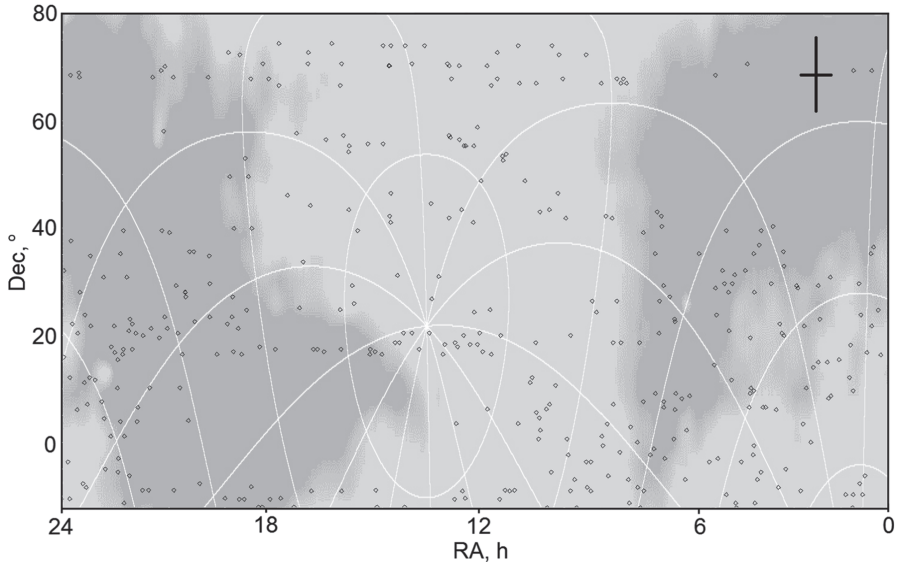


Рис. 19. Положення виявлених в огляді 2011–2018 рр. джерел транзієнтного радіовипромінювання на карті Північного неба

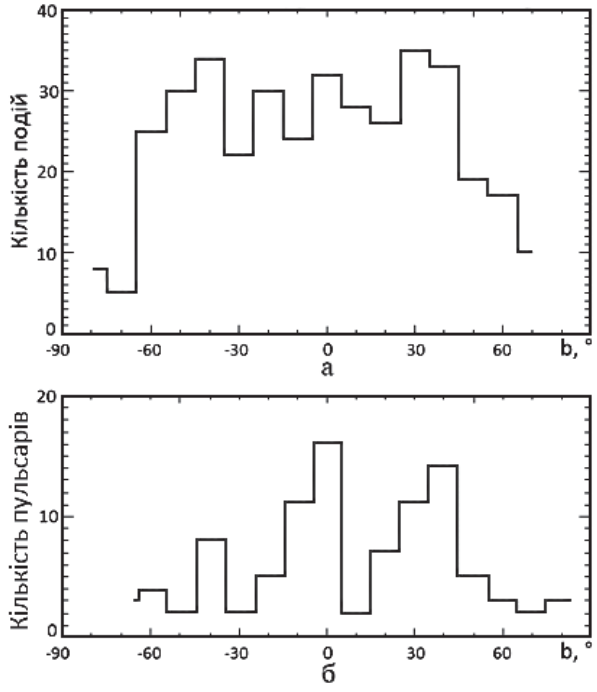


Рис. 20. Гістограми розподілів за галактичною широтою знайдених у огляді 380 сигналів (верхня панель) та відомих пульсарів із $DM < 30$ пк·см$^{-3}$ і періодом $P > 200$ мс (нижня панель) [52]

Отже, висока чутливість радіотелескопа та висока роздільна здатність приймальної апаратури дозволили поглибити наші знання про спорадичне та транзієнтне випромінювання космічних джерел на низьких частотах. Розроблені методи розпізнавання й усунення штучних і природних завад, використання всіх доступних критеріїв підтвердження космічної природи сигналів дозволять ефективніше виконувати пошуки блискавок [66], імпульсних сигналів від нейтронних зір та інших джерел, зокрема, і транзієнтного радіовипромінювання.

5. Висновки

Описаних успіхів детектування спорадичного та транзієнтного радіовипромінювання досягнуто завдяки розширенню апаратних можливостей і розвитку методів використання всіх доступних критеріїв для підтвердження космічної природи зареєстрованих сигналів.

Відкриті в ході досліджень особливості різних типів сигналів дають змогу точніше налаштовувати параметри пошуку. Так, для підвищення чутливості спостережень відкритої тонкої структури блискавок у атмосфері Сатурна (тривалості мікросекундної структури в десятки разів коротші за такі ж структури земних блискавок) потрібно збільшувати часову роздільну здатність. З цією ж метою використовується інформація про дисперсійну затримку в міжпланетному середовищі.

Запис декількох променів УТР-2 одночасно є дуже важливим способом перевірки напряму приходу сигналів за рахунок “ON-OFF” аналізу даних. Дуже важливими є також одночасні спо-

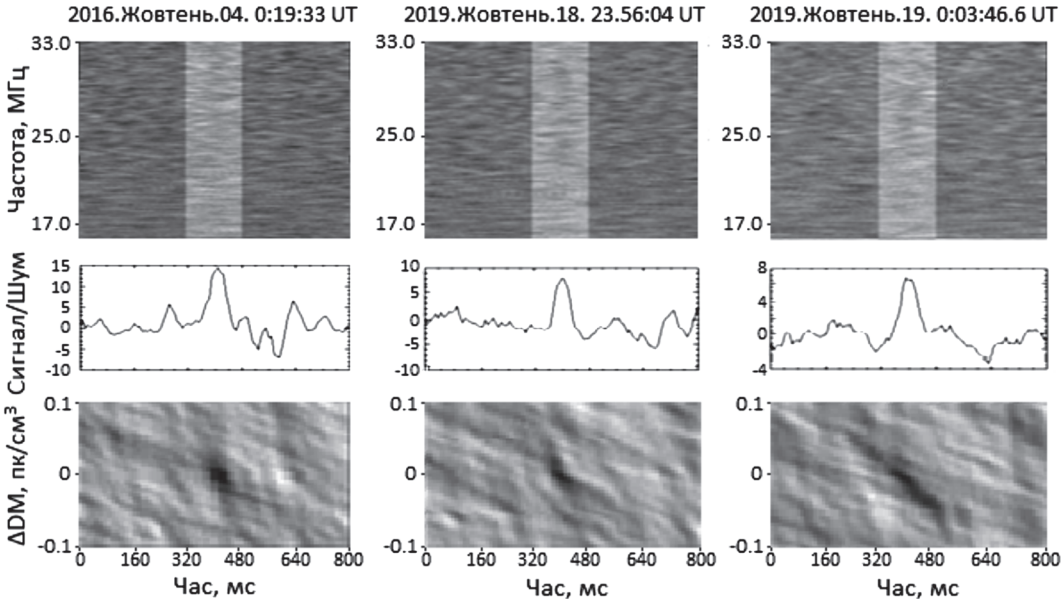


Рис. 21. Три імпульси джерела J0337+3937 з DM (зліва направо) (7.03 ± 0.05), (7.02 ± 0.05) і (6.942 ± 0.05) пк·см$^{-3}$

стереження тих самих областей неба різними антенами. Але важливо, щоб ефективна площа антен була близькою, оскільки при степеневій (наприклад, квадратичній) залежності інтенсивності спорадичних сигналів від вірогідності їх появи різниця в чутливості антен підкреслиться у відповідному степені.

Вкрай важливо адаптувати методи очищення сигналів від радіозавад, з одного боку, до типу джерела, а з іншого – до завадової обстановки. За такої умови вельми бажано, щоб комп'ютерні процедури автоматично налаштовувалися на врахування нюансів і постійну зміну завадового середовища. Для цього слід оптимально використовувати наявні обчислювальні потужності.

Аналізуючи наведені в статті різноманітні методи верифікації космічної природи нерегулярних сигналів, можна сформулювати пріоритетні напрями розвитку астрономічної техніки, методики спостережень та процедур обробки для їх надійної реєстрації. Оскільки вірогідність появи транзієнтних подій від конкретного джерела є дуже низькою, доцільно розширити як поле зору (дві координати в картинній площині), так і крок та діапазон за мірою дисперсії (дистанція від спостерігача – третя координата), здійснюючи фактично "сліпий" пошук сигналів від цілої низки типів джерел спорадичного та транзієнтного радіовипромінювання з урахуванням того, що широкосмуговість і короткотривалість є характерними для них. Тому, по-перше, радіотелескоп повинен мати мінімум два, а краще – десятки та більше променів, які, по-друге, працюють у повному робочому діапазоні частот із роздільною здатністю порядку мікросекунд. З огляду на виконані оцінки та отримані підтвердження у процесі вивчення блискавок в атмосфері Сатурна, навіть у разі спостережень найближчого космічного джерела блискавок – Венери – цієї роздільної здатності буде достатньо для компенсації дисперсійної затримки та детектування коротких потужних розрядів. Очікувана дисперсійна затримка буде лише в кілька разів меншою, ніж між Землею та Сатурном, оскільки густина сонячного вітру змінюється обернено пропорційно квадрату відстані від Сонця. Ця затримка буде порядку сотень мікросекунд у частотному діапазоні від десяти до декількох десятків мегагерц і відповідатиме $\mathrm{DM} \approx 10^{-5}$ пк·см$^{-3}$. З іншого боку, з огляду на розсіяння на низьких частотах, верхня межа пошуку за мірою дисперсії може бути $50 \div 100$ пк·см$^{-3}$.

Дуже важливим методом верифікації космічної природи сигналів є також одночасні спостереження двома або більше віддаленими радіотелескопами приблизно однакової чутливості. Порівняння параметрів спорадичних і транзієнтних сигналів, записаних двома різними радіотелескопами, які мають різні місцеві рівні радіозавад і відмінності у стані іоносфери над кожним

із інструментів, забезпечить високу надійність реєстрації сигналів космічного походження.

Все вищезгадане дозволить ще ефективніше вивчати спорадичне та транзієнтне випромінювання відомих і нових космічних джерел.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. McLaughlin M. A., Lyne A. G., Lorimer D. R., Kramer M., Faulkner A. J., Manchester R. N., Cordes J. M., Camilo F., Possenti A., Stairs I. H., Hobbs G., D'Amico N., Burgay M., and O'Brien J. T. Transient radio bursts from rotating neutron stars. *Nature*. 2006. Vol. 439, Is. 7078. P. 817–820. DOI: 10.1038/nature04440
2. Burke B. F. and Franklin K. L. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter. *J. Geophys. Res.* 1955. Vol. 60, Is. 2. P. 213–217. DOI: 10.1029/JZ060i002p00213
3. Kaiser M. L., Desch M. D., Warwick J. W., and Pearce J. B. Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn. *Science*. 1980. Vol. 209, Is. 4462. P. 1238–1240. DOI: 10.1126/science.209.4462.1238
4. Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Литвиненко Л. М., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Стьопкін С. В., Шепелєв В. О., Зарка Ф., Рукер Г. О., Лекашо А., Панченко М., Брук Ю. М., Токарський П. Л., Бубнов І. М., Єрін С. М., Колядін В. Л., Мельник В. М., Калініченко М. М., Станіславський О. О., Доровський В. В., Христенко О. Д., Шевченко В. В., Бєлов О. С., Грідін А. О., Антонов О. В., Бовкун В. П., Резніченко О. М., Борцов В. М., Квасов Г. В., Остапченко Л. М., Шевчук М. В., Шевченко В. А., Яцків Я. С., Вавілова І. Б., Брауде І. С., Шкуратов Ю. Г., Рябов В. Б., Підгорний Г. І., Тимошевський А. Г., Литвиненко О. О., Галанін В. В., Рябов М. І., Браженко А. І., Ващишин Р. В., Французенко А. В., Кошовий В. В., Іванишин О. Л., Лозінський А. Б., Харченко Б. С., Васильєва Я. Ю., Кравцов І. П., Васильківський Є. В., Литвиненко Г. В., Муха Д. В., Василенко Н. В., Шевцова А. І., Мірошніченко А. П., Кугай Н. В., Соболєв Я. М., Цвик Н. О. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 1. С. 5–73. DOI: 10.15407/rpra26.01.005
5. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Grießmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
6. Милостная К. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Фишер Г., Зарка Ф., Сидорчук М. А. Тонкая временная структура молний на Сатурне. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2014. Т. 19, № 1. С. 10–19. DOI: 10.15407/rpra19.01.010
7. Захаренко В. В. Спорадическое излучение радиоастрономических источников и его исследование в декаметровом диапазоне *Радіофізика і радіоастрономія*. 2011. Т. 16, № 2. С. 121–135.
8. Warwick J. W., Parce J. B., Evans D. R., Carr T. D., Schauble J. J., Alexander J. K., Kaiser M. L., Desch M. D., Pedersen M., Lecacheux A., Daigne G., Boischot A., and Barow C. H. Planetary Radio Astronomy Observations from Voyager 1 Near Saturn. *Sience*. 1981. Vol. 212, Is. 4491. P. 239–243. DOI: 10.1126/science.212.4491.239
9. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Grießmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus*. 2013. Vol. 224, Is. 1. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
10. Zakharenko V., Mylostna C., Konovalenko A., Zarka P., Fischer G., Grießmeier J.-M., Litvinenko G., Rucker H., Sidorchuk M., Ryabov B., Vavriv D., Ryabov V., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Pallier L., Schneider J., Kozhyn R., Vinogradov V., Mukha D., Weber R., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. 2012. *Planet. Space Sci.* Vol. 61, Is. 1. P. 53–59. DOI:10.1016/j.pss.2011.07.021
11. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., and Denis L. A low-noise, high dynamic range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 510. id. A16. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335
12. Захаренко В. В., Николаенко В. С., Ульянов О. М., Мотиенко Р. А. Приемник с высоким временным разрешением для исследования радиоизлучения. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 3. С. 233–241.
13. Mylostna K., Zakharenko V., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Grießmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Nikolaenko V., and Shevchenko V. Study of Saturn electrostatic discharges in a wide range of time scales. *Odessa Astronomical Publications*. 2013. Vol. 26, Is. 2. P. 251–253.
14. Милостная К. Ю., Захаренко В. В. Поиск и исследование грозовой активности на Сатурне и других планетах Солнечной системы. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2013. Т. 18, № 1. С. 12–25.
15. Fischer G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C., and Delcroix M. A giant thunderstorm on Saturn. *Nature*. 2011. Vol. 475. P. 75–77. DOI: 10.1038/nature10205

16. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Grießmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Study of Saturn electrostatic discharges with high time resolution. In: *European Planetary Sciences Congress Abstracts*. London, 08–13 September 2013. Vol. 8. id. EPSC2013-130
17. Рябов Б. П., Герасимова Н. Н. *Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера.* Киев: Наукова Думка, 1990. 236 с.
18. Рябов Б. П. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. II. Локализация области S-излучения. *Астрон. Вестник*. 1986. Т. 20, № 1. С. 20–34.
19. Рябов Б. П. Диаграмма направленности S-компоненты декаметрового радиоизлучения Юпитера. *Астрон. Вестник*. 1990. Т. 24, № 3. С. 221–231.
20. Б. П. Рябов, В. А. Шевченко. Аппаратурный комплекс для исследования декаметрового излучения Юпитера на радиотелескопе УТР-2. *Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы*. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1982. С. 178–179.
21. Рябов Б. П., Архипов А. В., Шевченко В. А. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. I. Морфология S-бурь. *Астрон. Вестник*. 1985. Т. 19, № 4. С. 296–318.
22. Рябов Б. П. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. III. Некоторые Физические характеристики источника S-излучения. *Астрон. Вестник.* 1990. Т. 24, № 2. С. 103–118.
23. Рябов Б. П., Декаметровое радиоизлучение Юпитера. IV. Структура диаграммы направленности S-излучения. *Астрон. Вестник*. 1988. Т. 22, № 2. С. 21–29.
24. Ryabov B. P. Jovian S emission: Model of radiation source. *J. Geophys. Res*. *Planet.* 1994. Vol. 99, Is. E4. P. 8441–8449. DOI: 10.1029/93JE02525
25. Ryabov B. P. Jovian S-emission: Decametric high sensitivity observations and model of radiation source. In: *Planetary Radio Emissions III*, *3rd International Workshop Proceedings.* (September 2-4, 1991. Graz, Austria). H. O. Rucker, S. J. Bauer, and M. L. Kaiser, eds. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, 1992. P. 125–144.
26. Рябов Б. П. Спорадическое радиоизлучение Юпитера. Мультимасштабные динамические спектры. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2001. Т. 6, № 1. С. 103–130.
27. Ryabov B. P., Zarka P., Rucker H. O., Ryabov V. B., and Boudjada M. Y. Recurrent fine structures in Jovian S-burst emission. In: *Planetary Radio Emissions IV*, *4rd International Workshop Proceedings.* (September 9-11, 1996. Graz, Austria). H. O. Rucker, S. J. Bauer, and A. Lecacheaux, eds. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, 1997. P. 65–89.
28. Ryabov B. P., Zarka P., Rucker H. O., Ryabov V. B. and Boudjada M. Y. Jovian Decametric Emission: Regular Variabilities and Scale Invariants in S-Burst Dynamic Spectra. *Radio Phys. Radio Astron*. 1997. Vol. 2, No. 4. P. 402–418.
29. Литвиненко Г. В., Лекашо А., Рукер Х. О., Коноваленко А. А., Рябов Б. П., Виноградов В. В., Шапошников В. Е., Таубеншусс У. Модуляционные эффекты на динамических спектрах спорадического декаметрового излучения Юпитера. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2006. Т. 11, № 4. С. 325–347.
30. Litvinenko G. V., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Leitner M., and Shaposhnikov V. E. Internal structure of the Jovian simple S-burst obtained with the wavelet analysis technique. *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 426. P. 343–351. DOI: 10.1051/0004-6361:200400018
31. Ryabov V. B., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Zarka P., Kozhin R., Vinogradov V. V., and Shevchenko V. A. Jupiter S-bursts: Narrow-band origin of microsecond subpulses. *J. Geophys. Res*. *Space Phys.* 2007. Vol. 112, Is. A9. id. A09206. DOI: 10.1029/2007JA012607
32. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylkivskyi Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Grießmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum*. 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
33. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Лекашо А., Розолен К., Рукер Х. О. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08; B1133+16 в декаметровом диапазоне волн. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2006. Т. 11, № 2. С. 113–133.
34. Ульянов О. М., Дешпанде А., Захаренко В. В., Асгекар А., Шанкар У. Двухчастотные наблюдения шести пульсаров с использованием УТР-2 и GEETEE радиотелескопов. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 1. С. 5–20.
35. Ul'yanov O. M. and Zakharenko V. V. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* 2012. Vol. 56, Is. 6. P. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
36. Абранин Е. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2. *Радіофізика і радіоастрономія*. 1997. Т. 2, № 1. С. 95–102.
37. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., and Konovalenko A. A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron*. 2001. Vol. 11, Is. 2. P. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
38. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov, O. M., Serylak M., Zarka P., Grießmeier J.-M., Cognard I., and Nikolaenko V. S. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. Vol. 431, Is. 4. P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
39. Захаренко В. В., Милостная К. Ю., Фишер Г., Коноваленко А. А., Зарка Ф., Гриссмейер Ж.-М., Рябов Б. П., Ваврив Д. М., Рябов В. Б., Рукер Х., Равье П., Сидорчук М. А., Цекони Б., Кофри А., Дени Л., Фабрис К., Кожин Р. В., Муха Д. В., Палье Л., Шнейдер И., Шевченко В. А., Виноградов В. В., Вебер Р., Николаенко В. С.

Идентификация молний на Сатурне, зарегистрированных радиотелескопом УТР-2 и космическим аппаратом “Кассини”. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2010. Т. 15, № 4. С. 361–368.

40. Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Seredkina A. A. Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey. *Odessa Astronomical Publications.* 2013. Vol. 26, Is. 2. P. 159–161. DOI: 10.18524/1810-4215.2013.26.82470
41. Offringa A. R., de Bruyn A. G., Biehl M., Zaroubi S., Bernardi G., and Pandey V. N. Post-correlation radio frequency interference classification methods *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. Vol. 405, Is. 1. P. 155–167. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x
42. Vasylieva I. Y. Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results [online]. 2015. Phd Thesis ed. Observatoire de Paris [viewed 19 April 2021]. Available from: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634
43. Ткачев В. Н., Захаренко В. В., Васильева Я. Ю., Царин Ю. А., Банникова Е. Ю., Илюшин В. В., Саваневич В. Е., Герасименко О. В., Анненков А. Б., Кулишенко С. Ф., Кулишенко Д. Ф. Использование грид-технологий в решении задач радиофизики и радиоастрономии. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2013. Т. 18, № 2. С. 176–188.
44. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Zarka P., and Konovalenko O. O. Search for Transient Signals in the Data of Decameter Survey of Northern Sky. *Adv. Astron. Space Phys.* 2016. Vol. 6, Is. 2. P. 79–84. DOI: 10.17721/2227-1481.6.79-84
45. Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. First Results. *Radio Phys. Radio Astron*. 2014. vol. 19, no. 3, P. 197–205. DOI: 10.15407/rpra19.03.197
46. Mylostna K. Y., Zakharenko V. V., Fischer G., Konovalenko A. A., and Zarka P. Study of SED’s emission parameters. In: *Planetary Radio Emissions VIII*, *8th International Workshop Proceedings*. (October 25-27, 2016. Seggauberg, Austria). G. Fischer, M. Panchenko, and P. Zarka, eds. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, 2017. P. 223–231.
47. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A., and Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 568. id. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201423927
48. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the Northern sky. *Odessa Astronomical Publications.* 2016. Vol. 29. P. 179–183. DOI: 10.18524/1810-4215.2016.29.85210
49. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., and Mykhailova S. S. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Observations and Data Processing. In: *9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW’2016.* Kharkiv, Ukraine. 2016. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538020
50. Захаренко В. В., Кравцов И. П., Васильева Я. Ю., Коноваленко А. А., Ульянов О. М., Колядин В. Л. Поиск низкоинтенсивных помех и распределений характеристик транзиентных сигналов в данных декаметрового обзора Северного неба. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2018. Т. 23, № 2. С. 79–93. DOI: 10.15407/rpra23.02.079
51. Захаренко В. В., Кравцов И. П., Васильева Я. Ю. Декаметровый обзор Северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Параметры индивидуальных импульсов. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2017. Т. 22, № 1. С. 31–44. DOI: 10.15407/rpra22.01.031
52. Кравцов І. П. Огляд північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання декаметрових хвиль: дис. … канд. фіз.-мат. наук. Радіоастрономічний інститут НАН України, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. Харків, 2018.
53. Кравцов І. П., Захаренко В. В., Васильєва Я. Ю., Шевцова А. І., Єрін С. М., Ульянов О. М., Коноваленко О. О., Васильківський Є. В., Мясоєд А. І. Перше детектування на декаметрових хвилях і уточнення параметрів випромінювання радіопульсарів PSR J2325-0530, PSR J0613+3731 і PSR J1426+52. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2020. Т. 25, № 3. С. 193–210. DOI: 10.15407/rpra25.03.193
54. Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., and Hobbs M. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* 2005. Vol. 129, Is. 4. P. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488
55. CSIRO., 2020. *ATNF Pulsar Catalogue.* Australia Telescope National Facility. [online table]. [viewed 3 May 2021]. Available from: https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/
56. Hankins T. H., Kern J. S., Weatherall J. C., and Eilek J. A. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar. *Nature*. 2003. Vol. 422. P. 141–143. DOI: 10.1038/nature01477
57. Hankins T. H. and Eilek J. A. Radio emission signatures in the Crab Pulsar. *Astrophys. J*. 2007. Vol. 670, Is. 1. P. 693–701. DOI: 10.1086/522362
58. Johnston S. and Romani R. W. Giant pulses from PSR B0540–69 in the Large Magellanic Cloud. *Astrophys. J*. 2003. Vol. 590, Is. 2. P. L95–L98. DOI: 10.1086/376826
59. West Virgian University., 2016. *The RRATalog* [online]. Morgantown, USA: West Virgian University. [viewed 3 May 2021]. Available from: http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/
60. Keane E. F. and Kramer. M. On the birthrates of Galactic neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2008. Vol. 391, Is 4. P. 2009–2016. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.14045.x
61. Malofeev V. M., Malov O. I., and Teplykh D. A. Radio emission from AXP and XDINS. *Astrophys. Space. Sci.* 2007. Vol. 308. P. 211–216. DOI: 10.1007/s10509-007-9341-y
62. Voges W., Aschenbach B., Boller Th., Bräuninger H., Briel U., Burkert W., Dennerl K., Englhauser J., Gruber R., Haberl F., Hartner G., Hasinger G., Kürster M., Pfeffermann E., Pietsch W., Predehl P., Rosso C., Schmitt J. H. M. M., Trümper J., and Zimmermann H. U. The ROSAT all–sky survey bright source catalogue. *Astron. Astrophys.* 1999. Vol. 349. P. 389–405.

63. Kondratiev V. I., McLaughlin M. A., Lorimer D. R., Burgay M., Possenti A., Turolla R., Popov S. B., and Zane S. New limits on radio emission from X–ray dim isolated neutron stars. *Astrophys. J*. 2009. Vol. 702, Is. 1. P. 692–706. DOI: 10.1088/0004-637X/702/1/692
64. Hodosán G., Helling C., and Rimmer P. B. Exo-lightning radio emission: the case study of HAT-P-11b. 2017. *arXiv:1711.08053 [astro-ph.EP]*. DOI: 10.1553/PRE8s345
65. Kravtsov I., Zakharenko V., Vasylieva I., Ulyanov O., Yerin S., Vasylkivskyi Y., and Konovalenko O. Detection of repetitive pulses from the sporadic decameter radio emission source. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. (September 21-25, 2020. Kharkiv). Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 800–804. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252720
66. Aplin K. L., Fischer G., Nordheim T. A., Konovalenko A., Zakharenko V., and Zarka P. Atmospheric Electricity at the Ice Giant. *Space Sci. Rev*. 2020. Vol. 216, Is. 2. id. 26. DOI: 10.1007/s11214-020-00647-0

REFERENCES

1. MCLAUGHLIN, M. A., LYNE, A. G., LORIMER, D. R., KRAMER, M., FAULKNER, A. J., MANCHESTER, R. N., CORDES, J. M., CAMILO, F., POSSENTI, A., STAIRS, I. H., HOBBS, G., D'AMICO, N., BURGAY, M. and O'BRIEN, J. T., 2006. Transient radio bursts from rotating neutron stars. *Nature*. vol. 439, is. 7078, pp. 817–820. DOI: 10.1038/nature04440
2. BURKE, B. F. and FRANKLIN, K. L., 1955. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter. *J. Geophys. Res.* vol. 60, is. 2, pp. 213–217. DOI: 10.1029/JZ060i002p00213
3. KAISER, M. L., DESCH, M. D., WARWICK, J. W. and PEARCE, J. B., 1980. Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn. *Science*. vol. 209, is. 4462, pp. 1238–1240. DOI: 10.1126/science.209.4462.1238
4. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., LYTVYNENKO, L. M., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEPKIN, S. V., SHEPELEV, V. A., ZARKA, P., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., PANCHENKO, M., BRUCK, YU. M., TOKARSKY, P. L., BUBNOV, I. M., YERIN, S. M., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., KALINICHENKO, M. M., STANISLAVSKY, O. O., DOROVSKYY, V. V., KHRISTENKO, O. D., SHEVCHENKO, V. V., BELOV, O. S., GRIDIN, A. O., ANTONOV, O. V., BOVKUN, V. P., REZNICHENKO, O. M., BORTSOV, V. M., KVASOV, G. V., OSTAPCHENKO, L. M., SHEVCHUK, M. V., SHEVCHENKO, V. A., YATSKIV, YA. S., VAVILOVA, I. B., BRAUDE, I. S., SHKURATOV, Y. G., RYABOV, V. B., PIDGORNY, G. I., TYMOSHEVSKY, A. G., LYTVYNENKO, O. O., GALANIN, V. V., RYABOV, M. I., BRAZHENKO, A. I., VASHCHISHIN, R. V., FRANTSUZENKO, A. V., KOSHOVYY, V. V., IVANTYSHYN, O. L., LOZINSKY, A. B., KHARCHENKO, B. S., VASYLIEVA, I. Y., KRAVTSOV, I. P., VASYLKIVSKY, Y. V., LITVINENKO, G. V., MUKHA, D. V., VASYLENKO, N. V., SHEVTSOVA, A. I., MIROSHNICHENKO, A. P., KUHAI, N. V., SOBOLEV, YA. M. and TSVYK, N. O., 2021. The founder of the decameter radio astronomy in Ukraine academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 years old: history of creation and development of the national experimental base for the last half century. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 1, pp. 5–73. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.01.005
5. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEßMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron*. vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
6. MYLOSTNA, K. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., FISCHER, G., ZARKA, P. and SIDORCHUK, M. A., 2014. Fine time structure of lightnings on Saturn. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 1, pp. 10–19. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra19.01.010
7. ZAKHARENKO, V. V., 2011. Sporadic Radiation of Radio Astronomy Sources and its Study at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 16, no. 2, pp. 121–134. (in Russian).
8. WARWICK, J. W., PARCE, J. B., EVANS, D. R., CARR, T. D., SCHAUBLE, J. J., ALEXANDER, J. K., KAISER, M. L., DESCH, M. D., PEDERSEN, M., LECACHEUX, A., DAIGNE, G., BOISCHOT, A. and BAROW, C. H., 1981. Planetary Radio Astronomy Observations from Voyager 1 Near Saturn. *Sience*. vol. 212, is. 4491, pp. 239–243. DOI: 10.1126/science.212.4491.239
9. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEßMEIER, J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2013. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus.* vol. 224, is. 1, pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
10. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, C., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., FISCHER, G., GRIEßMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., RUCKER, H., SIDORCHUK, M., RYABOV, B., VAVRIV, D., RYABOV, V., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., KOZHYN, R., VINOGRADOV, V.,

MUKHA, D., WEBER, R., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2012. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* vol. 61, is. 1, pp. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021

11. RYABOV, V. B., VAVRIV, D. M., ZARKA, P., RYABOV, B. P., KOZHIN, R., VINOGRADOV, V. V. and DENIS, L., 2010. A low-noise, high dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. Astrophys.* vol. 510. id. A16. pp. 1–13. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335
12. ZAKHARENKO, V. V., NIKOLAENKO V. S., ULYANOV, O. M. and MOTIYENKO, R. A., 2007. A High Time Resolution Receiver for Radio Emission Investigation. *Radio Phys. Radio Astron*. vol. 12, no. 3, pp. 233–241. (in Russian).
13. MYLOSTNA, K., ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., KOLYADIN, V., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., SIDORCHUK, M., RUCKER, H., FISCHER, G., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., NIKOLAENKO, V. and SHEVCHENKO, V., 2013. Study of Saturn electrostatic discharges in a wide range of time scales. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 26, is. 2, pp. 251–253.
14. MYLOSTNA, K. Y. and ZAKHARENKO, V. V., 2013. Search and Study of Storm Activity on Saturn and Other Planets of the Solar System. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 1, pp. 12–25. (in Russian).
15. FISCHER, G., KURTH, W. S., GURNETT, D. A., ZARKA, P., DYUDINA, U. A., INGERSOLL, A. P., EWALD, S. P., PORCO, C. C., WESLEY, A., GO, C. and DELCROIX, M., 2011. A giant thunderstorm on Saturn. *Nature*. vol. 475, pp. 75–77. DOI: 10.1038/nature10205.
16. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, K., KONOVALENKO, A., KOLYADIN, V., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., SIDORCHUK, M., RUCKER, H., FISCHER, G., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2013. Study of Saturn electrostatic discharges with high time resolution. In: *European Planetary Sciences Congress Abstracts.* London, 08–13 September 2013. vol. 8, id. EPSC2013-130
17. RYABOV, B. P. and GERASIMOVA, N. N., 1990. *Sporadic Radio Emission of Jupiter at Decameter*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
18. RYABOV, B. P., 1986. Decametric radio emission of Jupiter. II. Localization of the S-component radiation region. *Astronomichrskii Vestnik.* vol. 20, no. 1, pp. 20–34. (in Russian).
19. RYABOV, B. P., 1990. Directional pattern of the S-component of the decameter radio emission of Jupiter. *Astronomichrskii Vestnik.* vol. 24, no. 3, pp. 221–231. (in Russian).
20. RYABOV, B. P. and SHEVCHENKO, V. A., 1982. Hardware complex for studying decameter radiation of Jupiter on the UTR-2 radio telescope. *Radio astronomy equipment, antennas, and techniques.* Yerevan, Armenia: Izd-vo AN ArmSSR, pp. 178–179.
21. RYABOV, B. P., ARKHIPOV, A. V. and SHEVCHENKO, V. A., 1985. Decametric radio emission of Jupiter. I. The morphology of S-burst storms. *Astronomichrskii Vestnik.* vol. 19, no. 4, pp. 296–318. (in Russian).
22. RYABOV, B. P., 1990. Decametric radio emission of Jupiter. III: Some physical characteristics of S-component sources. *Astronomicheskii Vestnik.* vol. 24, no. 2, pp. 103–118. (in Russian).
23. RYABOV, B. P., 1988. Decameter radio emission from Jupiter. IV. S-radiation pattern structure. *Astronomicheskii Vestnik*. vol. 22, no. 2. pp. 21–29. (in Russian).
24. RYABOV, B. P., 1994. Jovian S emission: Model of radiation source. *J. Geophys. Res. Planet.* vol. 99, is. E4, pp. 8441–8449. DOI: 10.1029/93JE02525
25. RYABOV, B. P., 1992. Jovian S-emission: Decametric high sensitivity observations and model of radiation source. In: H. O. RUCKER, S. J. BAUER, and M. L. KAISER, eds. *Planetary Radio Emissions III, 3rd International Workshop Proceedings.* September 2-4, 1991. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, pp. 125–144.
26. RYABOV, B. P., 2001. Jovian Decametric Emission. Multiscale Dynamic Spectra. *Radio Phys. Radio Astron*. vol. 6, no. 1, pp. 103–130. (in Russian).
27. RYABOV, B. P., ZARKA, P., RUCKER H. O., RYABOV, V. B. and BOUDJADA, M. Y., 1997. Recurrent fine structures in Jovian S-burst emission. In: H. O. RUCKER, S. J. BAUER, and A. LECACHEAUX, eds. *Planetary Radio Emission IV, 4rd International Workshop Proceedings.* September 9-11, 1996. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press., pp. 65–89.
28. RYABOV, B. P., ZARKA, P., RUCKER, H. O., RYABOV, V. B. and BOUDJADA, M. Y., 1997. Jovian Decametric Emission: Regular Variabilities and Scale Invariants in S-Burst Dynamic Spectra. *Radio Phys. Radio Astron*. vol. 2, no. 4, pp. 402–418.
29. LITVINENKO, G. V., LECACHEUX, A., RUCKER, H. O., KONOVALENKO, O. O., RYABOV, B. P., VYNOGRADOV, V. V., SHAPOSHNIKOV, V. E. and TAUBENSCHUSS, U., 2006. Modulation Effects on Dynamic Spectra of Sporadic Jovian Decameter Emission. *Radio Phys. Radio Astron*. vol. 11, no. 2, pp. 325–347. (in Russian).
30. LITVINENKO, G. V., RUCKER, H. O., VINOGRADOV, V. V., LEITNER, M. and SHAPOSHNIKOV, V. E., 2004. Internal structure of the Jovian simple S-burst obtained with the wavelet analysis technique. *Astron. Astrophys.* vol. 426, pp. 343–351. DOI: 10.1051/0004-6361:200400018
31. RYABOV, V. B., RYABOV, B. P., VAVRIV, D. M., ZARKA, P., KOZHIN, R., VINOGRADOV, V. V. and SHEVCHENKO, V. A., 2007. Jupiter S-bursts: Narrow-band origin of microsecond subpulses. *J. Geophys. Res*. *Space Phys.* vol. 112, is. A9, id. A09206. DOI: 10.1029/2007JA012607
32. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A.

and GRIEßMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum*. vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

33. ULYANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, O. O., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2006. Detection of Individual Pulses from Pulsars B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08 and B1133+16 in the Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 2, pp. 113–133. (in Russian).
34. ULYANOV, O. M., DESHPANDE, A., ZAKHARENKO, V. V., ASGEKAR, A. and SHANKAR, U., 2007. Two-Frequency Observations of Six Pulsars Using UTR-2 and GEETEE Radio Telescopes. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 1, pp. 5–20. (in Russian).
35. UL'YANOV, O. M. and ZAKHARENKO, V. V., 2012. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep*. vol. 56, is. 6. pp. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
36. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 1997. Structure and Parameters of New System of Antenna Amplification of Radio Telescope UTR-2. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 1, pp. 95–102. (in Russian).
37. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 2001. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron*. vol. 11, is. 2, pp. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
38. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.-M., COGNARD, I. and NIKOLAENKO, V. S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 431, is. 4, pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
39. ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., FISCHER, G., KONOVALENKO, O. O., ZARKA, P., GRIEßMEIER, J.–M., RYABOV, B. P., VAVRIV, D. M., RYABOV, V. B., RUCKER, H. O., RAVIER, P., SIDORCHUK, M. A., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., KOZHYN, R. V., MUKHA, D. V., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., SHEVCHENKO, V. A., VYNOGRADOV, V. V., WEBER, R. and NIKOLAENKO, V. S., 2010. Identification of Saturn Lightnings Recorded by the UTR-2 Radio Telescope and Cassini Spacecraft. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 15, no. 4, pp. 361–368. (in Russian).
40. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SEREDKINA, A. A., 2013. Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 26, is. 2, pp. 159–161. DOI: 10.18524/1810-4215.2013.26.82470
41. OFFRINGA, A. R., DE BRUYN, A. G., BIEHL, M., ZAROUBI, S., BERNARDI, G. and PANDEY, V. N., 2010. Post-correlation radio frequency interference classification methods. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 405, is. 1, pp. 155–167. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x
42. VASYLIEVA, I. Y. Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results [online]. 2015. Phd Thesis ed. Observatoire de Paris [viewed 19 April 2021]. Available from: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634
43. TKACHOV, V. M., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., TSARIN, YU. A., BANNIKOVA, E. YU., ILYUSHIN, V. V., SAVANEVYCH, V. E., GERASIMENKO, O. V., ANNENKOV, O. B., KULISHENKO, S. F. and KULISHENKO, D. F., 2013. Using grid-technologies for solving problems in radio physics and radio astronomy. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 2, pp. 176–188. (in Russian).
44. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O., ZARKA, P. and KONOVALENKO, O. O., 2016. Search for Transient Signals in the Data of Decameter Survey of Northern Sky. *Adv. Astron. Space Phys*. vol. 6, is. 2, pp. 79–84. DOI: 10.17721/2227-1481.6.79-84.
45. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2014. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. First Results. *Radio Phys. Radio Astron*. vol. 19, no. 3, pp. 197–205. DOI: 10.15407/rpra19.03.197
46. MYLOSTNA, K. Y., ZAKHARENKO, V. V., FISCHER, G., KONOVALENKO, A. A. and ZARKA, P., 2017. Study of SED's emission parameters. In: G. FISCHER, M. PANCHENKO, and P. ZARKA, eds. *Planetary Radio Emissions VIII*, *8th International Workshop Proceedings*. October 25-27, 2016. Vienna, Austria: Austrian Academy of Sciences Press, pp. 223–231.
47. RYABOV, V. B., ZARKA, P., HESS, S., KONOVALENKO, A., LITVINENKO, G., ZAKHARENKO, V., SHEVCHENKO, V. A. and CECCONI, B., 2014. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys*. vol. 568, id. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201423927
48. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2016. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the Northern sky. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 29, pp. 179–183. DOI: 10.18524/1810-4215.2016.29.85210
49. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O. and MYKHAILOVA, S. S., 2016. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Observations and Data Processing. In: *9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016.* Kharkiv, Ukraine. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538020
50. ZAKHARENKO, V. V., KRAVTSOV, I. P., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M. and KOLYADIN, V. L., 2018. Search for Low-Intensity Interference and Distributions of Transient Signals' Characteristics in the Data of Decameter Survey of Northern Sky. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 23, no. 2, pp. 79–93. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra23.02.079
51. ZAKHARENKO, V. V., KRAVTSOV, I. P. and VASYLIEVA, I. Y., 2017. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northen Sky. Parameters of Individual Pulses. *Radio Phys.*

Radio Astron. vol. 22, no. 1, pp. 31–44. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.01.031

52. KRAVTSOV, I. P., 2018. *Survey of the Northern sky in order to find sporadic radio emission sources in decameter wave range.* PhD thesis ed. Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University. (in Ukrainian).
53. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., SHEVTSOVA, A. I., YERIN, S. M., ULYANOV, O. M., KONOVALENKO, O. O., VASYLKIVSKYI, Y. V. and MYASOYED, A. I., 2020. First detection at the decameter wavelengths and clarification of radiation parameters of PSR J2325-0530, PSR J0613+3731, and PSR J1426+52 radio pulsars. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 25, no. 3, pp. 193–210. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra25.03.193
54. MANCHESTER, R. N., HOBBS, G. B., TEOH, A. and HOBBS, M., 2005. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* vol. 129, is. 4, pp. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488
55. CSIRO., 2020. *ATNF Pulsar Catalogue.* Australia Telescope National Facility. [online table]. [viewed 3 May 2021]. Available from: https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/
56. HANKINS, T. H., KERN, J. S., WEATHERALL, J. C. and EILEK, J. A., 2003. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar. *Nature*. vol. 422, pp. 141–143. DOI: 10.1038/nature01477
57. HANKINS, T. H. and EILEK, J. A., 2007. Radio emission signatures in the Crab Pulsar. *Astrophys. J*. vol. 670, is. 1, pp. 693–701. DOI: 10.1086/522362
58. JOHNSTON, S. and ROMANI, R. W., 2003. Giant pulses from PSR B0540–69 in the Large Magellanic Cloud. *Astrophys. J*. vol. 590, is. 2, pp. L95–L98. DOI: 10.1086/376826
59. WEST VIRGIAN UNIVERSITY., 2016. *The RRATalog* [online]. Morgantown, USA: West Virgian University. [viewed 3 May 2021]. Available from: http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/
60. KEANE, E. F. and KRAMER, M., 2008. On the birth-rates of Galactic neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc*. vol. 391, is. 4, pp. 2009–2016. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.14045.x
61. MALOFEEV, V. M., MALOV, O. I. and TEPLYKH, D. A., 2007. Radio emission from AXP and XDINS. *Astrophys. Space. Sci.* vol. 308, pp. 211–216 DOI: 10.1007/s10509-007-9341-y
62. VOGES, W., ASCHENBACH, B., BOLLER, TH., BRÄUNINGER, H., BRIEL, U., BURKERT, W., DENNERL, K., ENGLHAUSER, J., GRUBER, R., HABERL, F., HARTNER, G., HASINGER, G., KÜRSTER, M., PFEFFERMANN, E., PIETSCH, W., PREDEHL, P., ROSSO, C., SCHMITT, J. H. M. M., TRÜMPER, J. and ZIMMERMANN, H. U., 1999. The ROSAT all–sky survey bright source catalogue. *Astron. Astrophys.* vol. 349, pp. 389–405.
63. KONDRATIEV, V. I., MCLAUGHLIN, M. A., LORIMER, D. R., BURGAY, M., POSSENTI, A., TUROLLA, R., POPOV, S. B. and ZANE, S., 2009. New limits on radio emission from X-ray dim isolated neutron stars. *Astrophys. J*. vol. 702, is. 1, pp. 692–706. DOI: 10.1088/0004-637X/702/1/692
64. HODOSÁN, G., HELLING, C. and RIMMER, P. B., 2017. Exo-lightning radio emission: the case study of HAT-P-11b. *arXiv:1711.08053 [astro-ph.EP]*. DOI: 10.1553/PRE8s345
65. KRAVTSOV, I., ZAKHARENKO, V., VASYLIEVA, I., ULYANOV, O., YERIN, S., VASYLKIVSKYI, Y. and KONOVALENKO, O., 2020. Detection of repetitive pulses from the sporadic decameter radio emission source. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine. pp. 800–804. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252720
66. APLIN, K. L., FISCHER, G., NORDHEIM, T. A., KONOVALENKO, A., ZAKHARENKO, V. and ZARKA, P., 2020. Atmospheric Electricity at the Ice Giant. *Space Sci. Rev*. vol. 216, is. 2, id. 26. DOI: 10.1007/s11214-020-00647-0

V. V. Zakharenko [1,2], V. B. Ryabov [3], I. P. Kravtsov [1], K. Yu. Mylostna [1], V. Yu. Kharlanova [1], I. Y. Vasylieva [1], O. M. Ulyanov [1], O. O. Konovalenko [1], M. M. Kalinichenko [1,4], P. Zarka [5], H. O. Rucker [6], G. Fischer [6], S. M. Yerin [1], J.-M. Grießmeier [7], M. A. Sydorchuk [1], A. I. Shevtsova [1], A. O. Skoryk [1], and V. A. Shevchenko [1]

[1] Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

[2] V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61002, Ukraine

[3] Complex and Intelligent Systems Dept.,
Future University Hakodate,
116-2 Kamedanakano-cho, Hakodate, Hokkaido,
Japan 041-8655

[4] Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv
National Pedagogical University,
24, Kyivo-Moskovska St., Hlukhiv, 41400, Ukraine

[5] LESIA, Observatoire de Paris, CNRS,
PSL/SU/UPMC/UPD/SPC,
5, Place Jules Janssen, Meudon, F-92195, France

[6] Institut für Weltraumforschung,
Österreichische Akademie der Wissenschaften,
6, Schmiedlstraße, Graz, 8042, Austria

[7] LPC2E/CNRS, Université d'Orléans,
3A, Avenue de la Recherche Scientifique
45071, Orléans cedex 2, France

SPORADIC RADIO EMISSION OF SPACE OBJECTS AT LOW-FREQUENCIES

Purpose: The results of studies of sporadic radio emission of several types of space radio sources, including neutron stars and planets of the Solar System, are presented. The aim of this work is to review the latest achievements in the study of low-frequency radio emission of the Solar System planets and transient signals similar to pulsar pulses using the UTR-2 radio telescope. The importance of the development of the verification methods of the spaceborne radio emission in the study of sporadic signals from various sources is shown. *Design/methodology/approach:* The studies of sporadic signals of different nature are based on the common set of procedures for cleaning records from the terrestrial radio frequency interference (RFI) in the frequency-time pattern using the in-

formation on the nature of the particular type of sporadic radio emission, possible types of interference and signal distortion. Characteristic features of sporadic radio emission of different sources are given, and for each of them the optimal method of signal extraction is developed. The efficiency of the developed procedures for cleaning from noise using adjustable parameters is shown. This is done on the basis of observations of diverse types of space radio sources, such as lightnings in the atmospheres of planets, single pulses of neutron stars and sporadic radio emission of Jupiter.

Findings: The developed methods of signal extraction detection in the presence of radio-interference have allowed obtaining the unique results such as: the distribution of the total intensity of single pulses of neutron stars depending on the galactic latitude; the automatic search of lightnings in the Saturn's atmosphere in data due to the carefully elaborated RFI mitigation procedures, which made it possible to obtain the Saturn electrostatic discharge (SED) emission parameters based on the most complete set of events. Increased efficiency of the selection of Jupiter's S-radiation signals despite the data corruption by the presence of radio-interference, which was reached due to the carefully chosen parameters of data cleaning procedures, have allowed us to detect short and intensive bursts, being the most informative for determining the physical parameters of radio emission in the area of their generation.

Conclusions: The large effective area and high sensitivity of the UTR-2 radio telescope allow making the sporadic radio emission study with high temporal and frequency resolutions. Due to these factors we can apply a wide range of methods of space signals' detection in the presence of terrestrial radio-frequency interference of natural and artificial origin. The data cleaning parameters allow accounting for the characteristic features of space signals and to obtain important and even unique scientific results.

Key words: decameter wavelength range, UTR-2, sporadic radio emission, transients, lightning in the atmospheres of planets, Jupiter S-bursts

Стаття надійшла до редакції 21.05.2021