

# РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

В.Е. Абрамов-Максимов<sup>1</sup>, И.А. Бакунина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН, <sup>2</sup>НИУ ВШЭ

*e-mail: beam@gaoran.ru*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Квазипериодические флуктуации (КПФ) радиоизлучения Солнца были открыты более 50-ти лет назад (Durasova et al., 1971). Разные авторы используют разные термины: квазипериодические колебания, квазипериодические флуктуации, квазипериодические пульсации. Хотя иногда это явление выглядит как гармонические колебания, чаще оно имеет спорадический характер, поэтому лучше говорить о флуктуациях или пульсациях, а не о колебаниях. Практически сразу же после открытия КПФ выявилась их связь со вспышечной активностью (Kobrin et al., 1973; Aleshin et al., 1973). Три группы исследователей независимо друг от друга обнаружили эффект усиления мощности КПФ микроволнового излучения перед вспышкой (Berulis et al., 1973; Arbuzov, 1980; Aver'yanikhina et al., 1982; Berulis et al., 1983; Avdyushin et al., 1985). Кроме того, был обнаружен эффект усиления пульсаций геомагнитного поля перед протонными вспышками и его связь с пульсациями радиоизлучения Солнца (Bystrov et al., 1978; Bystrov et al., 1979). Позднее эффект усиления КПФ перед вспышками наблюдался также в мягком рентгеновском излучении (Zhdanov and Charikov, 1985; Tan et al., 2016, Zimovets et al., 2022).

Радиогелиограф Нобейма (NoRH) (Nakajima et al., 1994) открыл новые возможности исследования КПФ (Gelfreikh et al., 1999, 2006; Shibasaki, 2001). С использованием данных наблюдений на NoRH было обнаружено много случаев возрастания мощности КПФ перед вспышками с большим разнообразием квазипериодов от 3-х до 100 минут (Sych et al., 2009; Abramov-Maximov et al., 2011, Abramov-Maximov and Bakunina, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023).

В наших предыдущих работах мы обнаружили, что по данным корреляционных кривых, полученных по наблюдениям на радиогелиографе Нобейма, у 50-75% рассмотренных событий разной мощности наблюдаются предвспышечные флуктуации микроволнового излучения. Предвспышечные КПФ были выявлены в 75% мощных событий (M5 и мощнее) и в 50% более слабых событий (слабее M5) (Abramov-Maximov and Bakunina, 2023). При этом по характеру КПФ можно разделить на две группы: гармонические и спорадические. Длительность предвспышечных цугов составляет в среднем 5 импульсов (Abramov-Maximov and Bakunina, 2020). Детальный анализ нескольких событий показал, что наиболее сильно КПФ проявлялись в компактной зоне в активной области, которая совпадает с областью максимальной яркости микроволнового излучения во время вспышки (Abramov-Maximov and Bakunina, 2022). Предварительный анализ нескольких событий по данным наблюдений RSTN показал, что КПФ на более низких частотах (200–600 МГц) начинаются позднее, чем на высоких частотах, на 2–6 минут (Abramov-Maximov and Bakunina, 2024).

Детальный анализ пространственного расположения источников рентгеновских КПФ (Zimovets et al., 2022) показал, что в части событий предвспышечные рентгеновские КПФ и сами вспышки находились в разных активных областях. Кроме того, часто предвспышечные

КПФ наблюдаются уже на стадии роста сигнала от начинающейся вспышки. Поэтому вопрос, можно ли рассматривать наблюдаемые предвспышечные КПФ как предвестники вспышек, остается открытым. Отметим, что не существует четкого общепринятого понятия предвестника. Под предвестником мы можем понимать, например, событие (КПФ), которое, как правило, предшествует, другому событию (вспышка). При этом мы предполагаем, что между предвестником и последующей вспышкой существует какая-то пока нам неизвестная физическая связь.

Задачей данной работы является продолжение начатой нами работы по исследованию КПФ радиоизлучения перед вспышками по данным многочастотных наблюдений сети Radio Solar Telescope Network (RSTN), в частности, по выявлению возможной связи параметров КПФ и мощности последующих вспышек, а также с целью поиска ответа на вопрос, можно ли рассматривать предвспышечные КПФ как предвестники вспышек.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Для данной работы были использованы многочастотные наблюдения Солнца, выполненные на радиотелескопах сети RSTN (Guidice et al., 1981). RSTN состоит из четырех обсерваторий, равномерно расположенных по долготам, что позволяет вести непрерывный мониторинг полного потока солнечного радиоизлучения на 8-ми частотах: 245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800 и 15400 МГц. Наблюдательного материала накоплено очень много. В настоящей работе мы ограничились анализом данных только одной из станций RSTN – Learmonth, расположенной на западе Австралии, и только за период 2000-2002 гг.

Мы рассмотрели 8 событий, связанных со вспышками разной мощности. Данные о рассмотренных событиях приведены в таблице 1. Моменты начала, максимума и окончания вспышек указаны по двум источникам: SWPC PRF и каталог GOES. Кроме того, эти моменты показаны на графиках вертикальными линиями. Зелеными линиями указаны моменты начала вспышек, красными – максимумы. Сплошные линии показывают моменты по данным SWPC PRF, прерывистые – по каталогу GOES. Отсутствие линий на графиках означает, что соответствующие моменты не попадают в диапазон оси абсцисс.

Все приведенные рисунки имеют одинаковый формат. На двух верхних панелях показаны оригинальные временные профили и временные профили с вычтенным фоном. Попытки вычесть фон различными полиномами и методом EMD не дали удовлетворительных результатов. Фон был вычтен вручную. Были указаны опорные точки, через которые проведены интерполированием кривые. На остальных панелях приведены вейвлет-спектры, по которым были сделаны оценки квазипериодов. Полученные значения даны в Таблице 2. Значения квазипериодов лежат в диапазоне от 10 до 130 секунд. При этом преобладают значения 40-50 секунд.

На рис. 1 приведены временные профили полного потока радиоизлучения Солнца по данным наблюдений RSTN (Learmonth) на частотах 15.4 и 8.8 ГГц 13 марта 2000 г. перед вспышкой рентгеновского класса (по GOES) C6.8 в АО NOAA 8906. На обеих частотах можно видеть слабовыраженные предвспышечные цуги длительностью примерно 70-90 сек, состоящие из трех импульсов.

На рис. 2 показаны предвспышечные временные профили полного потока радиоизлучения Солнца 18 июня 2000 г. перед вспышкой X1.0 в АО NOAA 9033 на всех восьми частотах. В этом случае КПФ на самой низкой частоте 0.245 ГГц начинаются примерно на 1 минуту раньше, чем на остальных частотах. На более высоких частотах КПФ происходят практически одновременно.

На рис. 3 показаны временные профили полного потока радиоизлучения Солнца 30 сентября 2000 г. перед вспышкой X1.2 в АО NOAA 9169 тоже на пяти частотах в диапазоне 1.4-15.4 ГГц. В этом случае более мощной вспышки видны более мощные КПФ, но только на трех

частотах (4.9, 8.8 и 15.4 ГГц).

На рис. 4 показаны временные профили полного потока радиоизлучения Солнца 15 ноября 2000 г. перед вспышкой C5.7 в АО NOAA 9223. Этот случай аналогичен событию за 13 марта 2000 с почти такой же слабой вспышкой. В данном событии можно увидеть два слабых импульса длительностью около 30-40 сек.

На рис. 5 показаны временные профили полного потока радиоизлучения Солнца 24 августа 2002 г. перед вспышкой M1.8 в АО NOAA 10087. Это событие имеет общие черты с событиями, рассмотренными в нашей предыдущей работе (Abramov-Maximov and Bakunina, 2024). Предвспышечные цуги на низких частотах (0.610, 0.410 и 0.245 ГГц) начинаются примерно на 6 минут позже, чем на высоких частотах (1.415, 2.695 и 4.995 ГГц). На частотах 8.8 и 15.4 ГГц КПФ не видно.

На рис. 6 представлено самое яркое из рассмотренных в этой работе событие - 24 августа 2002 г., вспышка X3.1 в АО NOAA 10069. В этом случае предвспышечные КПФ можно разделить на три группы. Сначала начинаются КПФ на частотах 4.995, 8.800 и 15.4 ГГц. Примерно через 3 минуты начинается цуг на частоте 1.415 ГГц и, возможно, на частоте 2.695 ГГц. И еще спустя 6 минут начинаются цуги на частотах 0.610, 0.410 и 0.245 ГГц. При этом цуги на высоких частотах выглядят более плавными.

На рис. 7 показаны временные профили полного потока радиоизлучения Солнца 18 ноября 2002 г. перед вспышкой M7.4 в АО NOAA 10198. В этом событии КПФ видны на всех частотах. Наиболее ярко КПФ проявляются на частоте 0.245 ГГц. При этом КПФ на частоте 0.245 ГГц выглядят практически как синусоида и начинаются примерно на 1 минуту позднее, чем на других частотах.

Что касается природы предвспышечных флуктуаций, то в этом вопросе пока нет единого мнения. Приведем некоторые возможные объяснения. В работе (Sych et al., 2009) предполагается, что предвспышечные флуктуации радиоизлучения являются отражением волновых процессов, которые могут быть триггером вспышек. В работе (Соловьев и Киричек, 2023) предполагается, что перед вспышкой несколько раз может возникать плазменная неустойчивость в узком слое, из малого объема которого каждый раз выделяется небольшое количество энергии, которое и проявляется как повторяющиеся радиовсплески перед вспышкой. Предвспышечные КПФ могут также возникать вследствие преднагрева плазмы согласно модели, представленной в работе (Tsap and Melnikov, 2023).

### 3. ВЫВОДЫ

Таким образом, мы проанализировали 8 вспышечных событий по данным многочастотных наблюдений сети радиотелескопов RSTN. В семи рассмотренных случаях выявлены предвспышечные КПФ. Сделанная по вейвлет-спектрам оценка квазипериодов дает в большинстве случаев значения 40-50 секунд. В одном событии с большой вспышкой класса M8.0 КПФ не проявились. В остальных случаях перед более мощными вспышками наблюдаются более сильные КПФ. Для самого мощного из рассмотренных событий класса X3.1 КПФ на более низких частотах начинаются с задержкой на несколько минут по отношению к КПФ на более высоких частотах.

Таблица 1. Рассмотренные события.

| Date        | AR<br>NOAA | Location | Time  |       |       | X-ray<br>Class |
|-------------|------------|----------|-------|-------|-------|----------------|
|             |            |          | Begin | Max   | End   |                |
| 2000-Mar-13 | 8906       | S17E15   | 0502  | 0504  | 0530  | C6.8           |
|             |            | S17E15   | 0459  | 0507  | 0514  |                |
| 2000-Jun-18 | 9033       | N23W85   | 0156  | 0157  | 0213  | X1.0           |
|             |            | N23W85   | 0152  | 0159  | 0203  |                |
| 2000-Jul-25 | 9097       | N06W08   | B0247 | U0252 | A0322 | M8.0           |
|             |            | N06W08   | 0243  | 0249  | 0254  |                |
| 2000-Sep-30 | 9169       | N07W91   | 2324  | 2326  | 2329  | X1.2           |
|             |            | N07W91   | 2313  | 2321  | 2328  |                |
| 2000-Nov-15 | 9223       | S15W48   | 0243  | 0244  | 0308  | C5.7           |
|             |            | S15W48   | 0218  | 0246  | 0250  |                |
| 2002-Aug-24 | 10069      | S02W81   | 0055  | 0103  | 0123  | X3.1           |
|             |            | S02W81   | 0049  | 0112  | 0131  |                |
| 2002-Aug-24 | 10087      | S09E52   | 0537  | 0546  | 0632  | M1.8           |
|             |            | S09E52   | 0538  | 0548  | 0559  |                |
| 2002-Nov-18 | 10198      | S17E56   | 0204  | 0206  | 0222  | M7.4           |
|             |            | S17E56   | 0201  | 0208  | 0211  |                |

## Примечания к Таблице 1.

Данные в Таблице 1 даны согласно двум источникам.

1) “Weekly PRF” (первые строки по каждой вспышке):

The Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data,

[https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/swpc-products/weekly\\_reports/PRFs\\_of\\_SGD/](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/swpc-products/weekly_reports/PRFs_of_SGD/)

2) Каталог GOES (вторые строки по каждой вспышке):

<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>

В колонке Location указано положение оптической вспышки.

В колонке Begin приведены моменты начала вспышек (“B” означает “не позднее”), Max – моменты максимума вспышек (“U” означает не-точность в определении момента), End – моменты окончания вспышек (“A” означает “не ранее”), X-ray class – мощность вспышек по классификации по GOES.

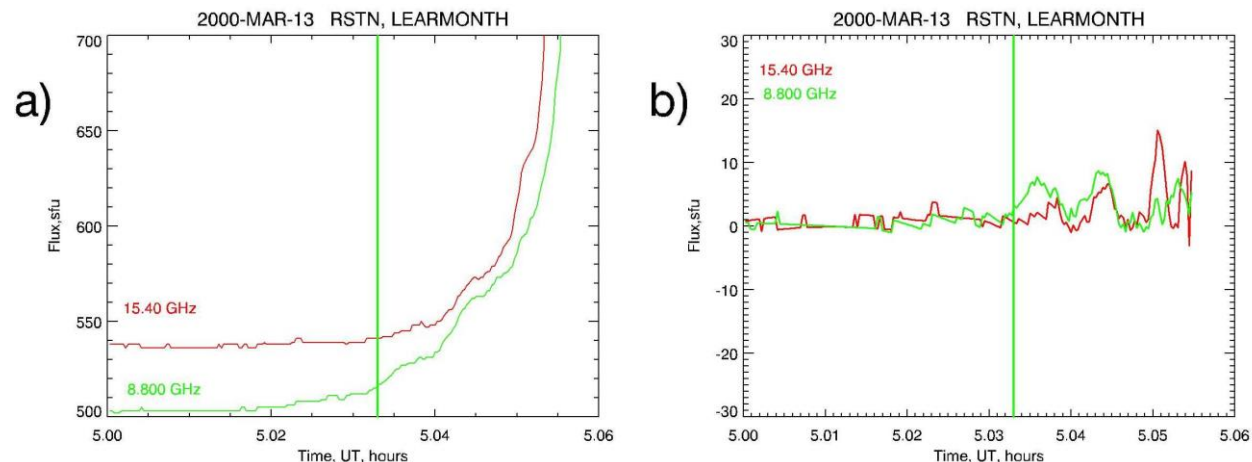


Рис. 1. а) Временные профили полного потока радиоизлучения Солнца по данным наблюдений RSTN (Learmonth) 13 марта 2000 г. перед вспышкой C6.8 в АО NOAA 8906. Ось абсцисс – время UT в часах, 0 соответствует моменту 00:00 UT 13 марта 2000 г. Ось ординат – полный поток радиоизлучения Солнца в SFU (Solar Flux Unit,  $10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ). Кривая для частоты 8.8 ГГц сдвинута вверх на 180 sfu. б) Аналогично панели “а”, но с вычтенным фоном. Вертикальные зеленые и красные линии объяснены в тексте.

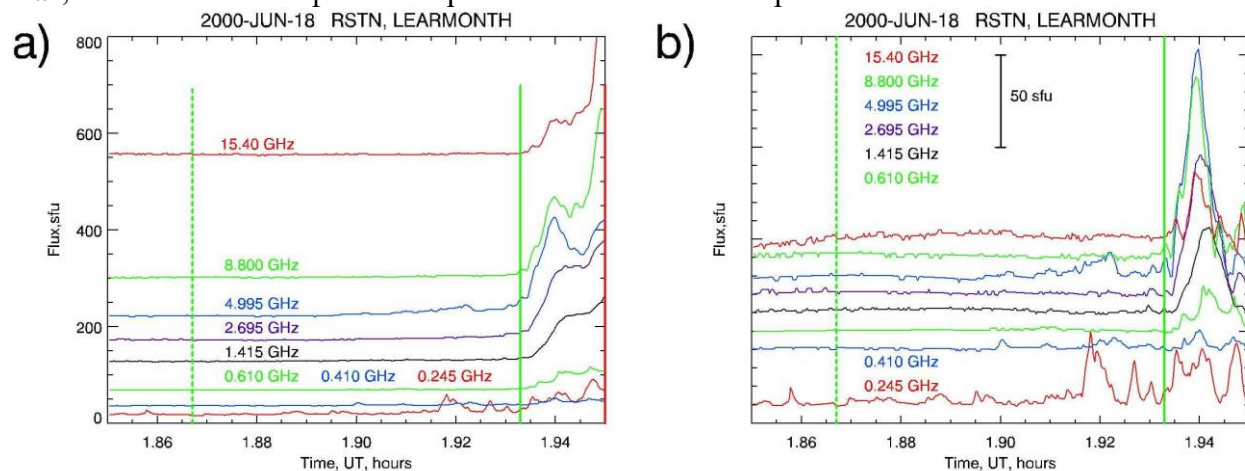


Рис. 2. Аналогично рис.1 для 18 июня 2000 г. перед вспышкой X1.0 в АО NOAA 9033.

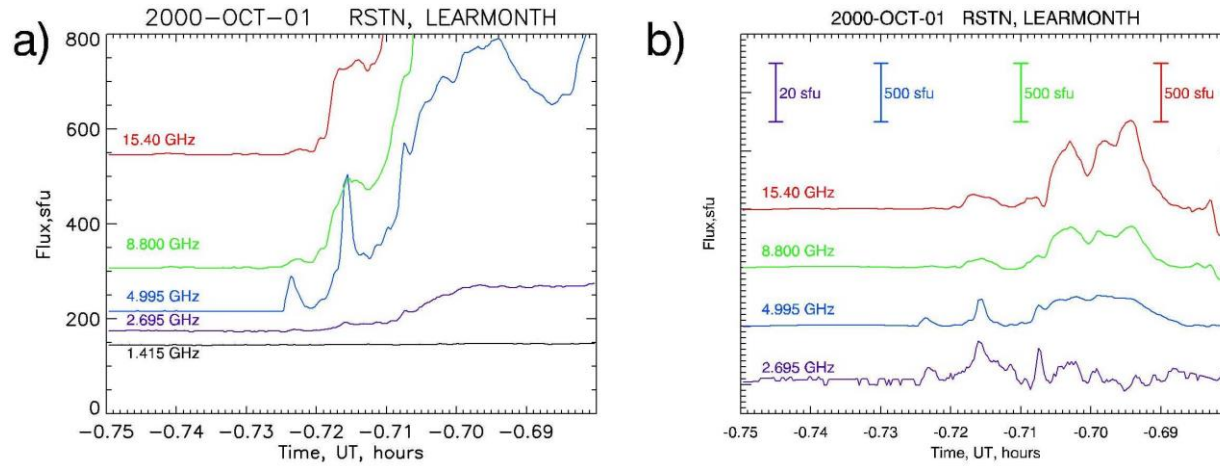


Рис. 3. Аналогично рис.1 для 30 сентября 2000 г. перед вспышкой X1.2 в АО NOAA 9169. Отрицательное время на оси означает, что это время до полуночи 1 октября.

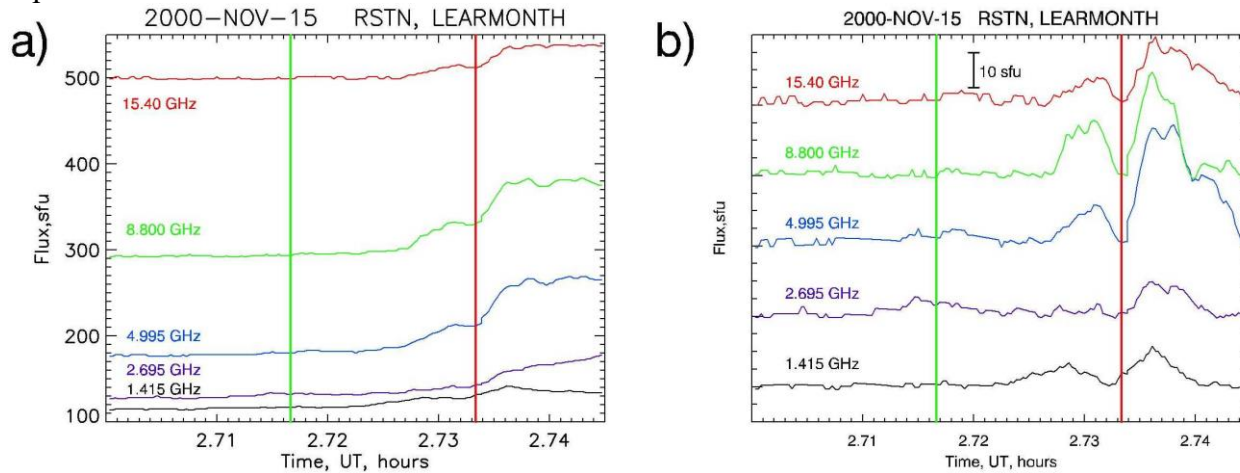


Рис. 4. Аналогично рис.1 для 15 ноября 2000 г. перед вспышкой C5.7 в АО NOAA 9223.

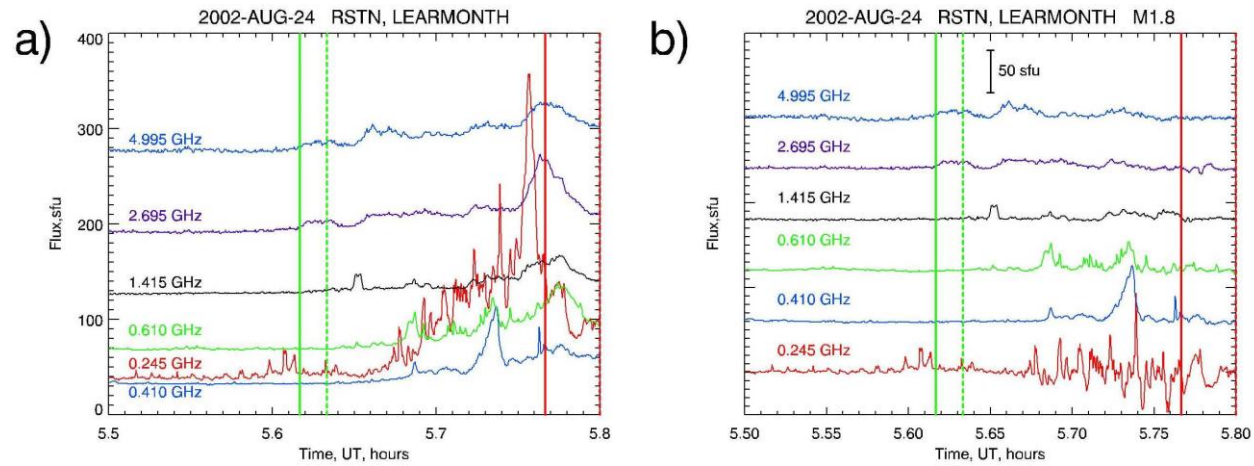


Рис. 5. Аналогично рис.1 для 24 августа 2002 г. перед вспышкой M1.8 в АО NOAA 10087.

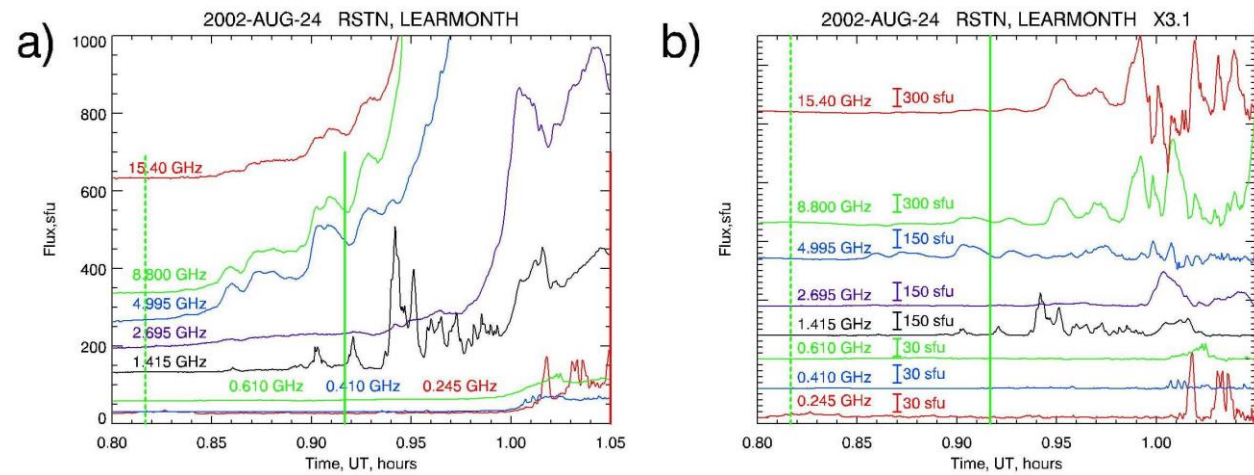


Рис. 6. Аналогично рис.1 для 24 августа 2002 г. перед вспышкой X3.1 в АО NOAA 10069.



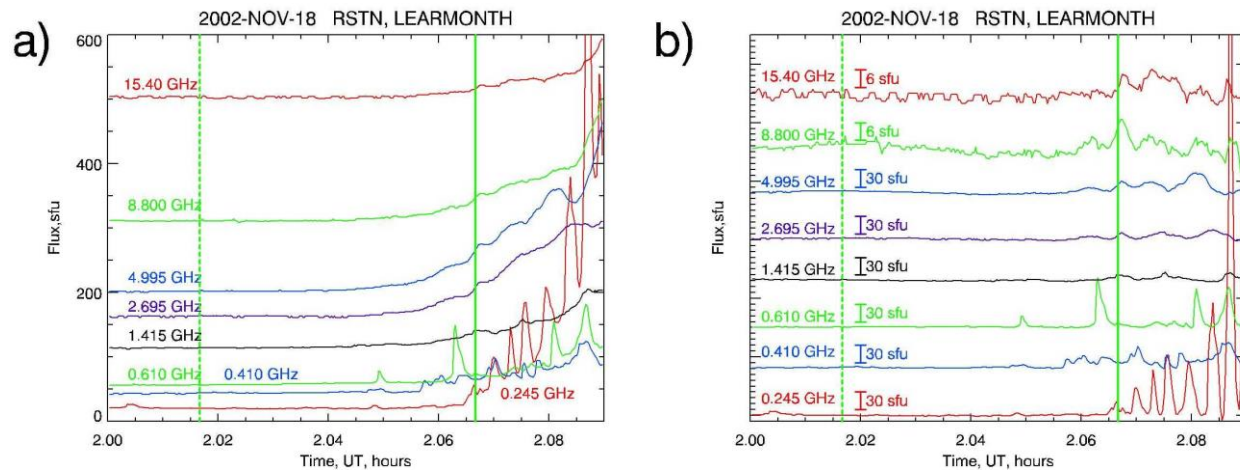


Рис. 7. Аналогично рис.1 для 18 ноября 2002 г. перед вспышкой M7.4 в АО NOAA 10198.

Таблица 2. Оценки квазипериодов в секундах.

| Date                     | Frequency, GHz |       |        |       |       |       |       |          |
|--------------------------|----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
|                          | 0.245          | 0.410 | 0.610  | 1.415 | 2.695 | 4.995 | 8.800 | 15.40    |
| 2000-Mar-13              | -              | -     | -      | -     | -     | -     | 30    | 25       |
| 2000-Jun-18              | 40,70          | 30,70 | 20     | -     | -     | 40,65 | -     | 65       |
| 2000-Jul-25              | -              | -     | -      | -     | -     | -     | -     | -        |
| 2000-Sep-30              | -              | -     | -      | -     | 50    | 30-35 | 30-35 | 35-40    |
| 2000-Nov-15              | -              | -     | -      | 50    | 50,70 | 50,65 | 50    | 30-50,65 |
| 2002-Aug-24 <sup>1</sup> | 40             | 65    | 70,140 | 130   | 120   | 130   | -     | -        |
| 2002-Aug-24 <sup>2</sup> | 60             | 10    | -      | 60    | 65    | 100   | 65    | 130      |
| 2002-Nov-18              | 10             | 30    | 20     | 35    | 30    | -     | 20    | 20       |

1) Перед вспышкой M8.1

2) Перед вспышкой X3.1



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Physics of Atomic Nuclei. V. 81. № 3. P. 379-383. 2018.
- Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Geomagnetism and Aeronomy. V. 59. No. 7. P. 822-826. 2019.
- Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Geomagnetism and Aeronomy. V. 60. No. 7. P. 846-852. 2020.
- Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Geomagnetism and Aeronomy. V. 62. No. 7. P. 895-902. 2022.
- Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Geomagnetism and Aeronomy. V. 63. No. 7. P. 916-919. 2023.
- Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Geomagnetism and Aeronomy. V. 64. No. 7. P. 1054-1058. 2024.
- Abramov-Maximov V.E., Gelfreikh G.B., Shibasaki K. Solar Phys. V. 273. P. 403-412. 2011.
- Aleshin V.I., Kobrin M.M., Korshunov A.I. Radiophysics and Quantum Electronics. V. 16. № 5. P. 571-576. 1973.
- Arbuzov S.I. Radiophysics and Quantum Electronics. V. 22. № 10. P. 803-811. 1980.
- Avdyushin S.I., Bogomolov A.F., Borisova E.A., et al. Akademiia Nauk SSSR, Doklady (ISSN 0002-3264). V. 283. №. 1. P. 67-70. 1985. In Russian.
- Aver'yanikhina E., Paupere M., Ozólinš G., Eliass M. Issled. Solntsa i Krasnykh Zvezd. №. 16. P. 61-74. 1982. In Russian.
- Berulis I. I., Molchanov A.P., Olyanyuk V.P., et al. Radiophysics and Quantum Electronics. V. 16. № 9. P. 1047-1049. 1973.
- Berulis I.I., Kozlovskii A.L., Losovskii B.Y., et al. Soviet Astronomy. V. 27. №. 5. P. 563-567. 1983.
- Bystrov M.V., Kobrin M.M., Snegirev S.D. Soviet Astronomy Letters. V. 4. P. 76-77. 1978.
- Bystrov M.V., Kobrin M.M., Snegirev S.D. Geomagnetism and Aeronomy. V. 19. P. 197-199. 1979.
- Durasova M.S., Kobrin M.M., Yudin O.I. Nature. V. 229. № 3. P. 82-84. 1971.
- Gelfreikh G.B., Grechnev V.V., Kosugi T., Shibasaki K. Solar Phys. V. 185. P. 177-191. 1999.
- Gelfreikh G.B., Nagovitsyn Yu.A., Nagovitsyna E.Yu. Publ. Astr. Soc. Japan. V. 58. P. 29-35. 2006.
- Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. Bulletin of the American Astronomical Society. V. 13. P. 553. 1981.
- Kobrin M.M., Pakhomov V.V., Durasova M.S., et al. Radiophysics and Quantum Electronics. V. 16. № 9. P. 1036-1039. 1973.
- Nakajima H., Nishio M., Enome S. et al. Proc. IEEE. V. 82, P. 705-713. 1994.
- Shibasaki K. The Astrophysical Journal. V. 550. P. 1113-1118. 2001.
- Solov'ev A. A., Kirichek E. A. Astronomy Letters. V. 49. No. 5. P. 257-269. 2023.
- Sych R., Nakariakov V.M., Karlicky M., Anfinogentov S. Astronomy and Astrophysics. V. 505. P. 791-799. 2009.
- Tan B., Yu Z., Huang J., Tan C., Zhang Y. The Astrophysical Journal. V. 833. Article id. 206. 6 pp. 2016.
- Tsap Yu.T., Melnikov V.F. Astronomy Letters. V. 49. P. 200-208. 2023.
- Zhdanov A.A., Charikov Y.E. Soviet Astronomy Letters. V. 11. P. 88-90. 1985.
- Zimovets I.V., Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Nizamov B.A. Geomagnetism and Aeronomy. V. 62. No. 4. P. 356-374. 2022.