

УДК 523.9

Исследование солнечной активности радиотелескопами Службы Солнца KRIM

Вольвач А. Е., Якубовская И. В.
Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория,
Ялта, 298688, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 12 июня 2018 г.
Отрецензировано: 27 июня 2018 г.
Принято к публикации: 5 июля 2018 г.

Аннотация: Радиоастрономический диагностический комплекс, созданный на базе радиотелескопа PT-22 и трех малых радиотелескопов, объединенных в Службу Солнца «KRIM», расположен в координатах $33^{\circ} 59' 30''$ E долготы и $44^{\circ} 23' 52''$ N широты. Служба Солнца «KRIM» проводит наблюдения Солнца в режиме мониторинга и алертов. Комплекс интегрирован во Всемирную Службу исследования солнечной активности, а ежедневно получаемые данные сохраняются в реальном времени в цифровом виде и выставляются на сайты мировой службы Солнца, которая включает 14 наземных станций в кооперации с орбитальными обсерваториями. В период минимума 11-летнего цикла солнечной активности с 6 по 10 сентября 2017 года радиотелескопы Службы Солнца KRIM зафиксировали ряд сильных солнечных радиовсплесков, произошедших в активном регионе NOAA 12673. Полученная информация хорошо коррелирует с данными других наземных и спутниковых обсерваторий, таких как RSTN (Сеть Солнечных Радиотелескопов) и GOES (Геостационарный оперативный спутник для изучения окружающего пространства). Это подтверждает высокое качество и точность работы радиотелескопов Службы Солнца KRIM.

Ключевые слова: радиотелескоп, Солнце, радиоизлучение, вспышка, динамический спектр.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Якубовская И. В. Исследование солнечной активности радиотелескопами Службы Солнца KRIM // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 3. С. 266—274.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Исследование солнечной активности радиотелескопами Службы Солнца KRIM / А. Е. Вольвач, И. В. Якубовская // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2018. — Т. 1, № 3. — С. 266—274.

Investigation of the solar activity of the KRIM Solar Telescope solar service

A. E. Volvach and I. V. Yakubovskaya

*Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
Yalta, 298688, Russian Federation
volvach@bk.ru*

Received: June 12, 2018

Peer-reviewed: June 27, 2018

Accepted: July 5, 2018

Abstract: *Radio astronomy diagnostic complex based on the RT-22 radio telescope and three small radio telescopes combined into the KRIM Sun Service is located at 33° 59' 30" E longitude and 44° 23' 52" N latitude. The KRIM Sun Service conducts observations of the Sun in monitoring mode and alerts. The complex is integrated into the World Service for Solar Activity Research, and the daily data is stored in real time in digital form and posted on the sites of the World Sun Service, which includes 14 ground stations in cooperation with orbital observatories. During the minimum period of the 11-year solar activity cycle from September 6 to 10, 2017, KRIM Sun Service radio telescopes recorded a number of strong solar radio bursts in the active region NOAA 12673. The information obtained correlates well with data from other ground-based and satellite observatories, such as RSTN (Network Solar Radio Telescopes) and GOES (Geostationary Operational Satellite for Surrounding Space). This confirms the high quality and accuracy of the KRIM Solar Service radio telescopes.*

Keywords *radio telescope, Sun, radio emission, flash, dynamic spectrum.*

For citation (IEEE): A. E. Volvach and I. V. Yakubovskaya, "Investigation of the solar activity of the KRIM Solar Telescope solar service," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 3, pp. 266–274, 2018. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.3.20

1. Введение

Солнечная активность оказывает огромное влияние на условия жизни на Земле. В то же время известно, что на Солнце происходят быстрые возмущения, с которыми связано освобождение больших энергий; частота их появления меняется с изменением фазы солнечного цикла. Освобождение запасенной энергии, имеющее характер взрыва, приводит к электромагнитному излучению и выбросу потоков частиц. Эти эрупции могут быть различными — от очень небольших до исключительно сильных, спо-

собных вызвать возмущения даже на Земле. Указанную совокупность сложных явлений мы называем солнечной вспышкой [1]. Во время вспышек, корональных выбросов масс и высокоскоростных потоков солнечного ветра существенно возрастает поток коротковолнового и радиоизлучения, растет скорость и энергия заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Достигая орбиты Земли, эти возмущения вызывают комплекс геофизических явлений (прекращение радиосвязи, магнитные бури, полярные сияния и т. п.). Особенно зависимы от уровня солнечной активности новые высокотехнологические направления человеческой деятельности: космонавтика, радиосвязь, спутниковая навигация, дистанционные системы контроля и управления, электростанции. Электромагнитное излучение доходит до Земли за 8 минут, а заряженные частицы могут попасть на Землю через 2—5 суток после их направленного выброса из места возникновения на Солнце.

Следовательно, необходимо накопление наблюдательных данных о долговременных вариациях солнечной активности и исследование различных теоретических возможностей ее объяснения. Для этого в Крымской астрофизической обсерватории были сконструированы и длительное время эксплуатируются радиотелескопы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов длин волн [2]. Они собирают сведения о состоянии хромосферы и короны Солнца, дают возможность получать информацию для анализа процессов энерговыделения в атмосфере Солнца и краткосрочного прогноза космической погоды.

2. Оборудование

Радиотелескоп РТ-22 — полноповоротное, альтазимутальное устройство с собирающей поверхностью зеркала 380 м^2 , оснащенное двумя радиометрическими комплексами.

1. *Миллиметровый комплекс.* Наблюдения проводятся на двух длинах волн одновременно с регистрацией параметров Стокса: полную интенсивность (I) на волне 8,2 мм и полную интенсивность и поляризованную по кругу составляющую (I,V) на волне 13,5 мм. Угловое разрешение радиотелескопа составляет 2.5' на обеих волнах. По чувствительности радиометры мм-диапазона сравнимы с радиометрами см-диапазона.

2. *Сантиметровый комплекс.* Угловое разрешение радиотелескопа на волнах 3.5, 2.8, 2.3 и 2.0 см составляет 6.0', 5.0', 4.1' и 3.6' соответственно. Поляриметр позволяет регистрировать полную интенсивность (I) и поляризованную по кругу составляющую (V) радиоизлучения одновременно на четырех волнах с наименьшим временным разрешением 0.1 с. Чувстви-

тельность радиотелескопа составляет 0.1 солнечных единиц потока (1 s.f.u. = 10^{-22} Вт/м²).

Процесс наблюдений заключается в сканировании диска Солнца по прямому восхождению с шагом по склонению, равному 1—2' с последующим наведением антенны по максимуму радиоизлучения локального источника на самой короткой длине волны и слежением за выбранной активной областью. Выбор объекта наблюдений осуществлялся в результате оценки прогнозируемых параметров для каждого из локальных источников, обнаруженных на диске Солнца по результатам сканирования. Обработка данных наблюдений проводится по специальной программе, и включает нормировку, учет паразитных сигналов, пересчет из милливольт в солнечные единицы потока. Собирающая поверхность телескопа позволяет выявлять тонкие детали всплесков шумовых бурь.

Радиотелескоп РТ-3 — параллактическое поворотное устройство с электрическим приводом по часовому углу, на котором укреплено параболическое зеркало диаметром 3 м с совмещенными облучателями на длины волн 10 и 12 см (частоты 2.5 и 2.85 ГГц). Размещен в радиопрозрачном куполе диаметром 6 м для защиты от метеовоздействий, что существенно улучшает качество и стабильность данных. Ширина ДН (диаграммы направленности) такой антенны при диаметре зеркала, равном 3 м, составляет 2.3—2.5°. Это обеспечивает прием радиоизлучения от всей поверхности радиодиска Солнца, размер которого немного превышает 0.5 угл.град. Ширина полосы пропускания каждого канала составляет 40 МГц, минимальная постоянная времени — 10 мс, запись сигнала осуществляется в цифровом виде с частотой отсчетов 1 Гц в дежурном режиме и 100 Гц в течение всплеска радиоизлучения.

Радиотелескоп РТ-2 — параллактическое поворотное устройство с электрическим приводом по часовому углу, на котором укреплено параболическое зеркало диаметром 2.5 м с совмещенными облучателями на длины волн 3 и 5 см (частоты 10 и 6 ГГц), размещен в радиопрозрачном куполе диаметром 6 м. На длине волны 3 см ширина ДН составляет 1°15', на длине волны 5 см — 1°45'. Ширина полосы пропускания каждого канала составляет 40 МГц, минимальная постоянная времени — 1 с.

Радиотелескоп РТ-М оснащен антенной 4×4 м, установленной на параллактической установке с электроприводом по часовому углу [3]. Она представляет собой синфазную решетку, состоящую из 16 элементов. Ширина полосы пропускания каждого канала составляет 250—350 МГц. Ширина луча составляет 11°, ширина полосы частот каждого канала составляет 300 кГц, минимальная постоянная времени — 1,25 мс, непрерывный

динамический диапазон — 30 дБ, запись цифрового сигнала происходит на частоте 400 Гц. Для регистрации коронального излучения установлен радиоспектрограф e-Callisto, рабочие частоты которого варьируются от 275 до 327 МГц (длины волн от 0.9 до 1.09 м).

3. Наблюдения

С 6 по 10 сентября 2017 года Солнце, находящееся на минимуме своей активности, произвело несколько мощных вспышек. Им присвоен рентгеновский класс X9.3, X8.2 и X2.2 [5] и они являются одними из наиболее сильных за последние 20 лет. Вспышки X9.3 и X8.2 сопровождались огромными извержениями миллиардов тонн вещества в космос. Эти облака, содержащие протоны, электроны и тяжелые ионы, были обнаружены датчиками на спутнике GOES 13, а так же наблюдались в изображениях коронографа LASCO C2 и C3, находящегося на борту космического аппарата ESA/NASA SOHO. Мощная вспышка X9.3 6 сентября, вызвала повышение плотности потока высокоэнергетических протонов с энергией 50 МэВ и 100 МэВ. Энергия превысила порог в 10 pfu (плотности потока протонов) для протонов с энергией 50 МэВ и почти достигла 10 pfu для протонов с энергией в 100 МэВ [5].

В изображении LASCO C2 12:48 UT заметен очень большой выброс коронального вещества. Вспышки и сопровождающие их КВМ вырвались из активного региона NOAA 12673, расположенного в гелиографических координатах S09 W45. Первое извержение КВМ произошло 6 сентября и произвело серьезную геомагнитную бурю, когда поток заряженных частиц достиг Земли вечером 7 сентября. 06.09.2017 в 12:02 UT обсерватория солнечной динамики (SDO) при помощи оборудования, установленного на спутниках GOES 15 и GOES 14, зарегистрировала мощную вспышку — восьмую по силе за последние 20 лет. Ей был присвоен рентгеновский класс X9.3 [5].

Служба Солнца KРИМ зафиксировала мощные всплески на радиотелескопах сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов длин волн. В 12:02 UT радиотелескопом РТ-М был зафиксирован мощный радиовсплеск на частотах 275 и 327 МГц. Мощной вспышке предшествовала более слабая, произошедшая с 08:57 до 09:17 UT. Ей присвоен рентгеновский класс X2.2 [5]. Она также была зафиксирована радиотелескопами РТ-2 и РТ-3 Службы Солнца KРИМ (рис. 1—4).

На рис. 2 хорошо видны сильные радиовсплески, произошедшие в 12:01 UT с максимальным значением плотности спектрального потока 3260 SFU на частоте 275 МГц и 2733 SFU на частоте 327 МГц.

На рис. 3 хорошо виден сильный радиовсплеск, произошедший в 09:10 UT с максимальным уровнем плотности спектрального потока 691 SFU на частоте 10 ГГц.

На рис. 4 хорошо виден сильный радиовсплеск, произошедший в 09:10 по UT, с максимальным уровнем плотности спектрального потока 941 SFU на 2.5 ГГц и 578 SFU на 2.85 ГГц.

Радиообсерватории Learmonth (Австралия) и San-Vito (Италия), входящие в сеть RSTN, принадлежащей Метеорологической службе ВВС (Военно-воздушных сил) США, также зафиксировали эти радиовсплески на частотах 245 МГц, 410 МГц, 2695 МГц, 4995 МГц, 8800 МГц и 15400 МГц.

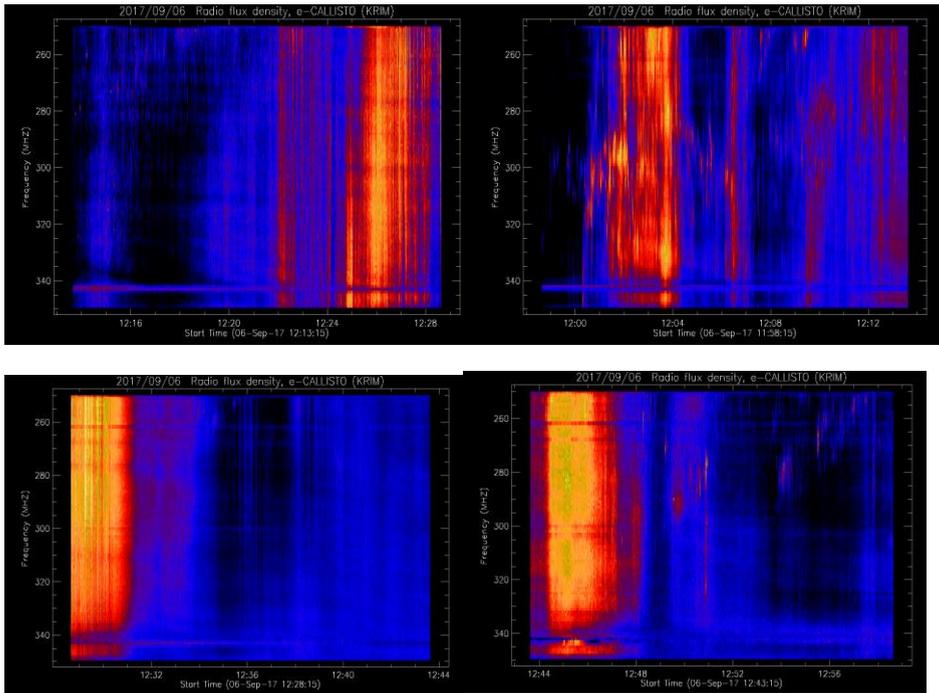


Рис. 1. Динамический спектр радиовсплеска IV типа 06.09.17 на частотах 273 МГц и 327 МГц, зафиксированный РТ-М, оборудованном спектрометром CALLISTO.

По оси X время UT, по оси Y – частота в МГц.

Fig. 1. Dynamic spectrum of a type IV 09.06.17 radio burst at frequencies of 273 MHz and 327 MHz recorded by a PT-M equipped with a CALLISTO spectrometer.

On the X-axis Time UT, on the Y-axis – frequency in MHz

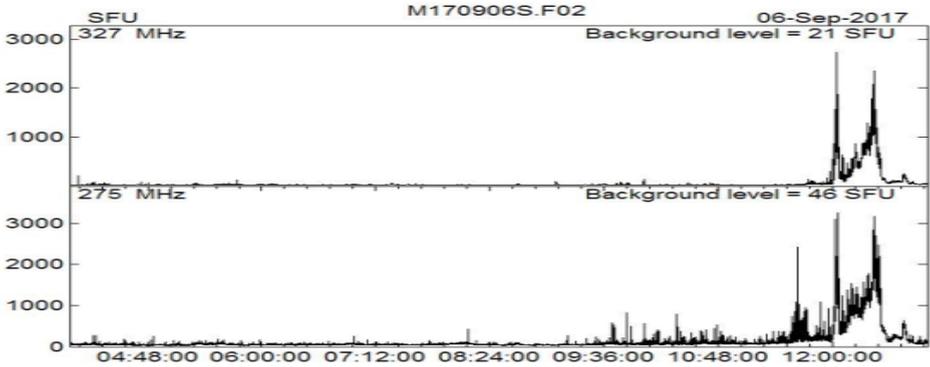


Рис. 2. Спектральные потоки радиоизлучения, зарегистрированные RT-M, на частотах 327 МГц и 275 МГц.

Fig. 2. Spectral radio emission streams recorded by RT-M at 327 MHz and 275 MHz

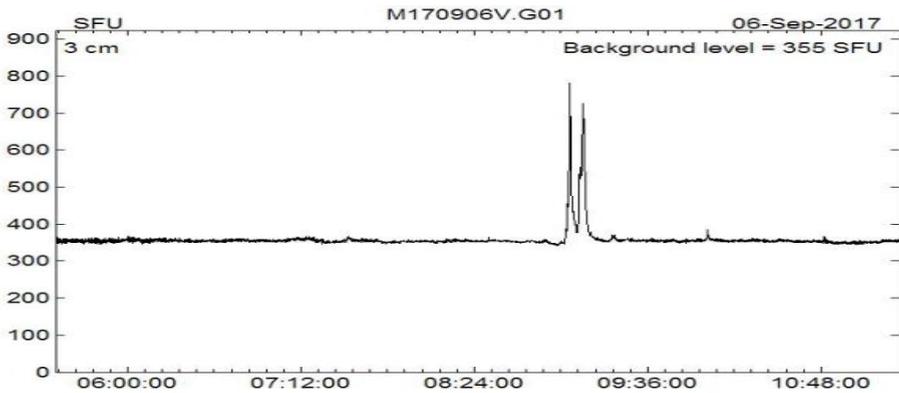


Рис. 3. Спектральный поток радиоизлучения, зарегистрированный радиотелескопом RT-2 на частоте 10 ГГц.

Fig. 3. The spectral radio emission flux recorded by the RT-2 radio telescope at a frequency of 10 GHz

4. Заключение

Сравнительный анализ представленных данных о мощных радиовсплесках, зафиксированных радиотелескопами Службы Солнца KRM, позволяет использовать данные для ежедневного мониторинга солнечной активности с целью дальнейшей их обработки для предсказания космической погоды и анализа ее влияния на Землю. Эти исследования имеют

важный прикладной характер в обеспечении национальной безопасности, как в гражданских, так и военных отраслях. Воздействие солнечных вспышек и сопровождающих их факторов, таких как солнечная радиация, в состав которой входят рентгеновское, радио и ультрафиолетовое излучение, влияет на работу навигационных спутников ГЛОНАСС и различных видов наземного оборудования.

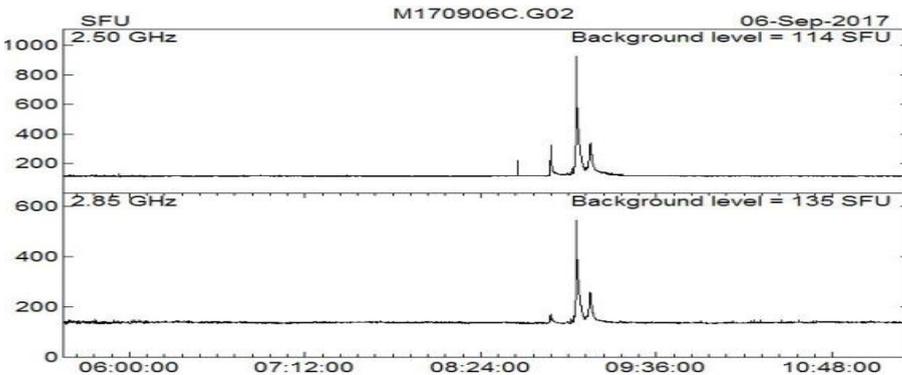


Рис. 4. Спектральные потоки радиоизлучения, зарегистрированные радиотелескопом РТ-3 на частотах 2,5 ГГц и 2,85 ГГц.

Fig. 4. Spectral radio emission streams recorded by the RT-3 radio telescope at 2.5 GHz and 2.85 GHz

Список литературы

1. Wild J. P., Smerd S. F., Weiss A. A. Solar Bursts. *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, Palo Alto, California, 1963. С. 291—366.
2. Юровский Ю. Ф. Аппаратура и методика наблюдений динамических спектров радиоизлучения Солнца на станции KRIM // *Кинематика и физика небесных тел.* 2013. Том. 29. № 6. С. 68—77.
3. Цветков Л. И., Юровский Ю. Ф. Диагностический комплекс солнечной активности на базе радиотелескопа РТ-22 НИИ КраО и малых радиотелескопов // *Космічна наука і технологія. Додаток.* 2003. Т. 9, № 2. С. 102—105.
4. Вольвач А. Е., Юровский Ю. Ф., Самисько К.В. и др. Мониторинг солнечной активности в радиодиапазоне станциями службы Солнца KRIM // *Изв. Крымской астрофиз. обс.* 2016. Т. 112, № 2. С. 179—186.
5. Сайт космической погоды. <https://www.swpc.noaa.gov/stp/solar/> (2017).

References

- [1] J. P. Wild et al. "Solar Bursts," *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, Palo Alto, California, 1963.
- [2] Yu. F. Yurovsky, "The equipment and procedure for observations of dynamic spectra of solar burst emission at the station KRIM," *Kinematics and physics of celestial bodies*, vol. 68, no. 6, pp. 68–77, 2013.

- [3] L. I. Tsvetkov and Yu. F. Yurovsky, “Diagnostic complex of solar activity on the basis of the RT-22 radio telescope of the Research Institute of CrAO and small radio telescopes,” *Space science and technology*, vol. 9, no 2, pp. 102–105, 2003. (In Russ.).
- [4] A. E. Volvach and Yu. F. Yurovsky, “Monitoring of solar activity in the radio range by the Sun service stations KRIM,” *Izv. Crimean Astrophys. Obs.* vol. 112, no. 2, pp. 179–186, 2016. (In Russ.).
- [5] Space weather site <https://www.swpc.noaa.gov/stp/solar/> (2017).

Информация об авторах

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым, Российская Федерация.

Якубовская Инна Валерьевна, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым, Российская Федерация.

Information about the authors

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Inna V. Yakubovskaya, researcher of FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.