

УДК 530.82

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”

© 2021 г. Е. В. Калинин<sup>1</sup>, М. В. Филиппов<sup>1,\*</sup>, В. С. Махмутов<sup>1</sup>, О. С. Максумов<sup>1</sup>,  
Ю. И. Стожков<sup>1</sup>, А. А. Квашнин<sup>1</sup>, Г. Н. Измайлов<sup>2</sup>, В. В. Озолин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

\**mfilippov@frik.ru*

Поступила в редакцию 27.02.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

В данной работе приводится краткое описание отдельных элементов, которые могут быть включены в состав научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”, предназначенной для проведения впервые внеатмосферного эксперимента на борту международной космической станции. Его целью является измерение терагерцового электромагнитного излучения как от спокойного Солнца, так и во время протекания активных процессов на Солнце (солнечные вспышки, выбросы корональной массы и т.д.), что необходимо для установления физической природы солнечной активности и солнечных вспышек. В качестве приемников терагерцового излучения рассмотрена возможность использования оптоакустических преобразователей (ячеек Голея), чувствительность, стабильность и время отклика которых определены в ходе предварительных лабораторных исследований в наземных условиях.

DOI: 10.31857/S0023420621010040

### ВВЕДЕНИЕ

Радиоизлучение солнечных активных областей и солнечных вспышек несет важную информацию о процессах ускорения заряженных частиц на Солнце, механизме переноса частиц из области их ускорения в области генерации радиоизлучения, позволяет исследовать физические условия и механизм генерации радиоизлучения в солнечной атмосфере. Длительные наземные измерения солнечного радиоизлучения охватывают широкий интервал частот от десятков кГц до десятков ГГц [17].

Однако диапазон электромагнитных волн в диапазоне  $\sim 1\text{--}15$  ТГц ( $1\text{ ТГц} = 10^{12}$  Гц) солнечного излучения на сегодняшний день является практически не исследованным, вследствие почти полного его поглощения в атмосфере Земли. Тем не менее, в земной атмосфере существуют отдельные узкие “окна прозрачности” в области частот, прилегающей к терагерцовому диапазону, в которых проводятся наземные солнечные наблюдения [7, 10, 16]. Так с 1999 года в горной астрономической обсерватории CASLEO (Аргентина) проводятся непрерывные наблюдения Солнца и солнечных вспышек на солнечном субмиллиметровом телескопе (SST) на частотах 210 и 405 ГГц [7]. Анализ полученных наземных данных позволил

установить ряд важных физических особенностей солнечных вспышек, свидетельствующих о возрастании потоков вспышечного излучения на частотах свыше 100 ГГц, об изменении потоков излучения на несколько порядков в течение нескольких минут (секунд). Оказалось, что гиротронный механизм радиоизлучения удовлетворительно описывающий частотный спектр до 100 ГГц не описывает наблюдаемое увеличение потоков излучения на частотах свыше 100–200 ГГц. Это предполагает наличие в области солнечной вспышки дополнительного источника излучения на указанных частотах. Интересным является также обнаружение тонкой временной структуры в вариациях излучения, связи субмиллиметрового излучения с выбросами корональной массы, рентгеновским, гамма-излучением солнечных вспышек и др. [3–6, 8, 11–13]. Эти экспериментальные результаты в настоящее время не нашли удовлетворительного теоретического объяснения и нуждаются в детальных измерениях солнечного терагерцового излучения.

Научная аппаратура “Солнце-Терагерц” предназначена для проведения первых внеатмосферных экспериментов на борту МКС по исследованию солнечного радиоизлучения в терагерцовом диапазоне волн как в условиях спокойного Солн-

ца, так и в условиях транзитных солнечных явлений (солнечные вспышки, выбросы корональной массы и др). Впервые будет реализована возможность непрерывных и детальных наблюдений Солнца на восьми частотах в диапазоне 0.4–15 ТГц.

Планируемые измерения существенно дополнят наземные радионаблюдения и позволят установить частотный спектр солнечного излучения и его временную динамику от микроволнового излучения до высокочастотного терагерцового диапазона. Знание частотного спектра излучения и его временных вариаций в активных областях на Солнце необходимо для установления адекватной физической природы солнечной активности и солнечных вспышек [1, 3, 4, 8]. Эти измерения будут иметь и важное прикладное значение для разработки оперативных методов прогнозирования мощных солнечных вспышек на Солнце, их воздействия на межпланетное пространство и земную магнитосферу, на электронные космические системы, наземные энергетические установки, коммуникационные системы и на атмосферные процессы.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Активная разработка новых экспериментальных подходов по созданию внеатмосферных систем детектирования солнечного терагерцового излучения началась в последнее десятилетие и привела к созданию первого прототипа солнечного фотометра для этой области энергий [5, 20]. В 2016 г. в период с 19 по 30.I. был проведен первый международный аэростатный эксперимент GRIPS в Антарктиде [2, 5, 13]. В состав его научной аппаратуры входил солнечный фотометр “SOLAR-T”, с помощью которого были выполнены наблюдения солнечного диска в терагерцовом диапазоне [5]. Было зарегистрировано солнечное вспышечное событие на указанных частотах 28.I.2016 года в 12.12.10 UT (рентгеновский балл вспышки С9.6). Одновременно это же событие было зарегистрировано на наземном субмиллиметровом солнечном телескопе (SST), на  $H_{\alpha}$  солнечном телескопе (HASTA) в Аргентине, а также, на космической обсерватории SDO [6, 7, 10, 11].

В создаваемой новой научной аппаратуре “Солнце-Терагерц” будет использован имеющийся опыт и результаты, полученные в разных немногочисленных наземных экспериментах, но в отличие от них впервые будет реализована возможность непрерывных и детальных наблюдений Солнца на восьми частотах в диапазоне 0.4–15 ТГц.

На рис. 1 показана трехмерная модель (вариант компоновки, разработанный на этапе эскизного

проектирования) научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”. Основой прибора являются 8 детекторов терагерцового излучения: оптоакустические преобразователи (ОАП) – ячейки Голея. Выбор этих детекторов обусловлен их одинаковой чувствительностью для всей области терагерцового излучения и линейной зависимостью выходного сигнала ячейки от поглощенной энергии (температуры) [5].

На рис. 2 приведена оптическая схема и состав одного детектирующего канала. Для приема и первичной фильтрации электромагнитного излучения, используется телескоп (большое и малое зеркала), выполненный по системе Кассегрена [19], поверхность которого рассеивает значительную часть падающего видимого излучения. В тоже время, рефлекторная система Кассегрена позволяет избежать сильного поглощения терагерцового излучения оптическими стеклами. Так как аберрации не оказывают влияния на концентрацию энергии на входном окне детектора, малое и большое зеркала являются сферическими.

Отрезающий фильтр (LPF), служит для пропускания терагерцового излучения и блокирования коротких волн, так как полосовые фильтры (BPF) [15, 18] являются прозрачными в оптическом диапазоне излучения.

Далее располагается оптический прерыватель (чоппер), который служит для модуляции сигнала, поступающего на входное окно ОАП (оптоакустического преобразователя “Ячейка Голея”). В научной аппаратуре “Солнце-Терагерц” предполагается использование ОАП GC-1D (<http://www.tydexoptics.com/>; [20]). Аналогичные преобразователи использовались в научной аппаратуре “SOLAR-T”.

Вышеописанная конфигурация зеркал позволяет сфокусировать на входном окне ОАП диаметром 6 мм пятно от излучающего объекта с угловым диаметром 0.5°.

Набор 8-ми частот в диапазоне ~0.4–15 ТГц позволит получить детальную информацию об особенностях частотного солнечного излучения, локализовать критическую частоту, на которой происходит изменение наклона (изгиба) этого спектра, т.е. установить частоту перехода спектра от известного гиротронного, например, к тепловому.

Наличие непрерывных солнечных измерений SST на частотах 0.2 и 0.4 ТГц позволит проводить взаимные калибровки научной аппаратуры “Солнце-Терагерц” на борту МКС и наземного телескопа. Предполагается, что один из восьми детектирующих каналов научной аппаратуры будут регистрировать солнечное излучение на частоте 0.4 ТГц.

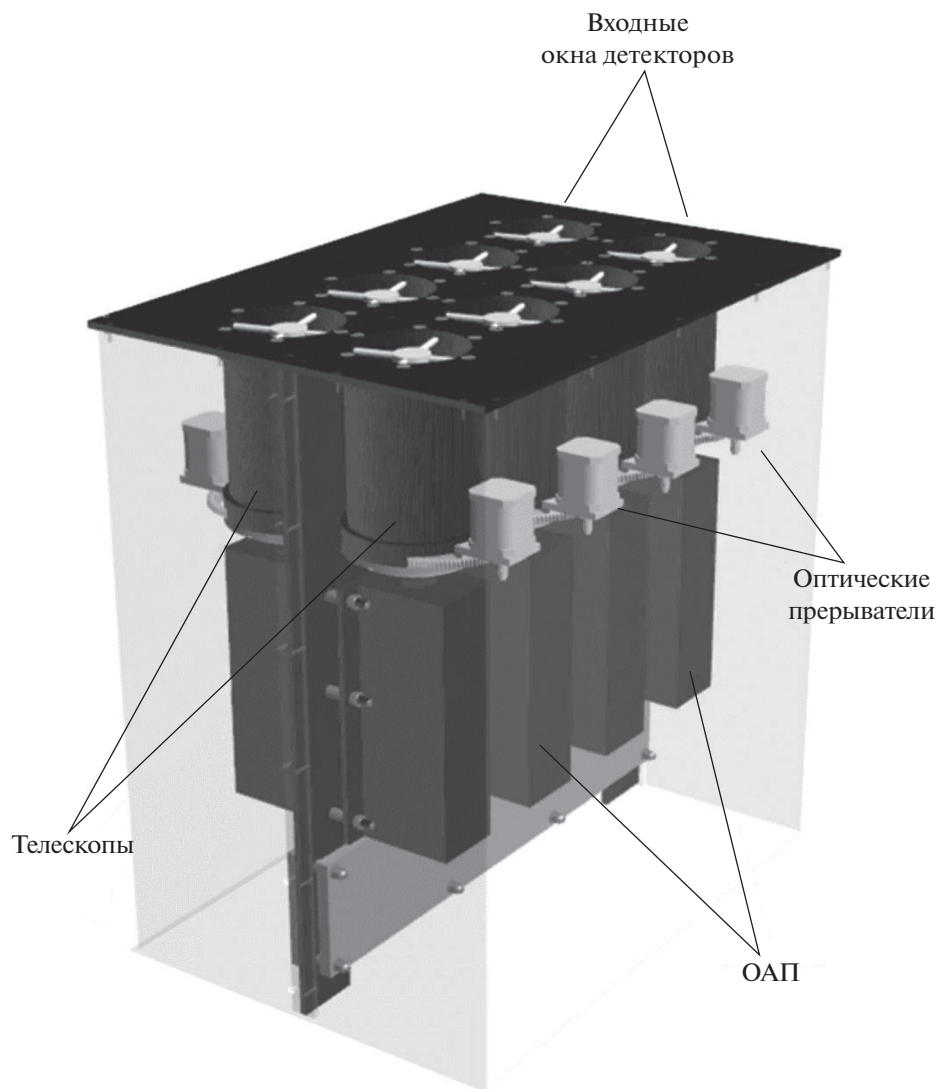


Рис. 1. Трехмерная модель корпуса и основных элементов научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”.

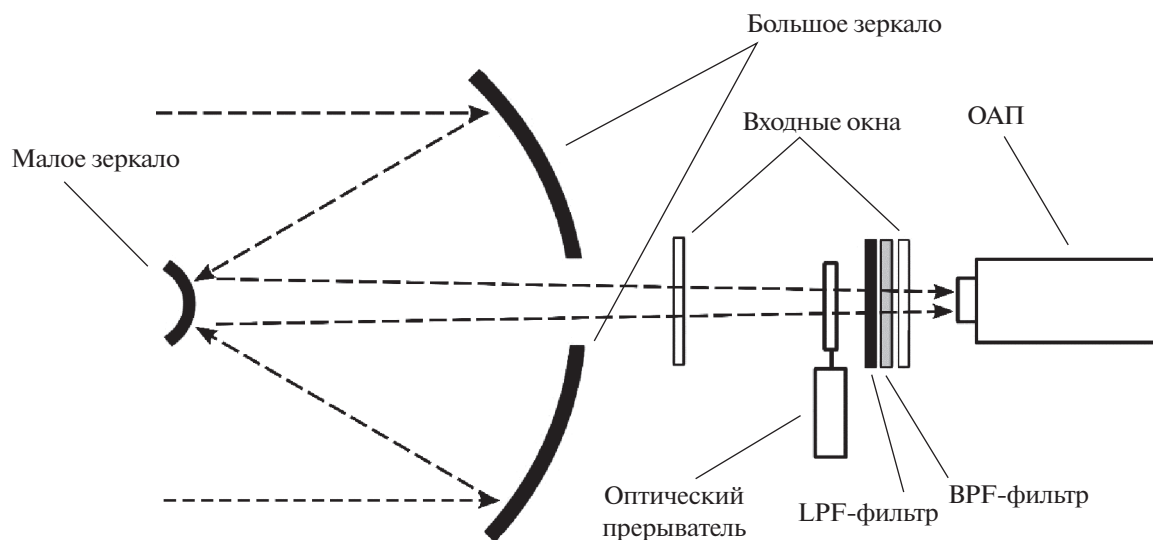
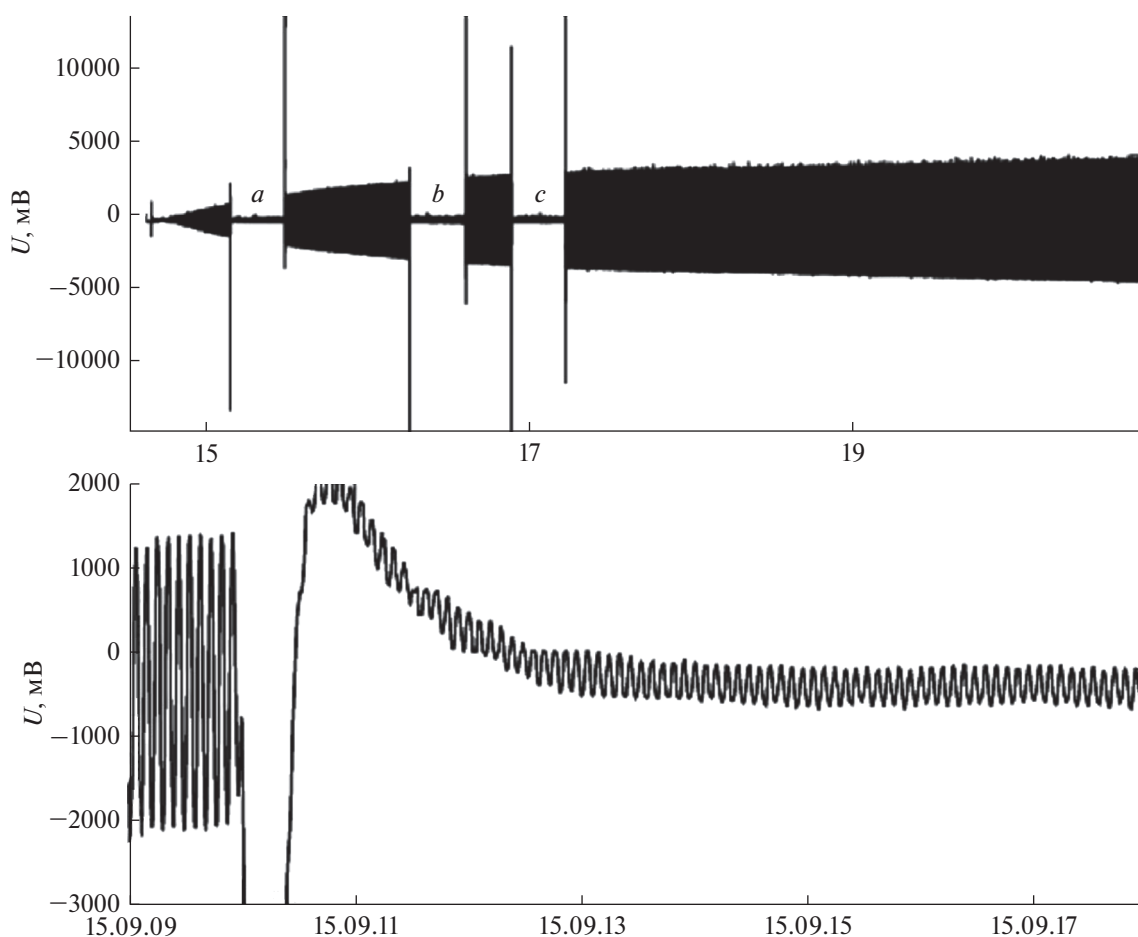


Рис. 2. Схематичное изображение оптического тракта детектора.



**Рис. 3.** Осциллограмма сигнала детектора в течение нескольких часов (верхняя панель). На временные интервалы *a*, *b*, *c* установка функционирует с установленными полосовыми ВРФ-фильтрами. Внизу – осциллограмма переходного процесса, зафиксированного детектором при установке полосового фильтра в корпус одиночного канала детектирования. Резкий спад сигнала соответствует моменту установки металлической заслонки с фильтром. Далее, спустя ~3 с, установка приходит в тепловое равновесие.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОДИНОЧНОГО КАНАЛА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Для проведения испытаний аппаратуры на этапах, предшествующих изготовлению опытных образцов, был изготовлен макет одиночного канала детектирования (в соответствии с [5, 20]). Он включает в себя детектор терагерцового излучения (рис. 2) и минимально необходимый комплект электроники. Макет обеспечивает замену полосовых фильтров в оптическом тракте, что позволяет моделировать работу детектора в различных частотных диапазонах.

На макете были проверены некоторые схемотехнические решения для опытного образца научной аппаратуры. В частности, был разработан и проверен предусилитель, в основе которой лежит преобразователь ток-напряжение [21] на базе операционного усилителя AD 820. После предусилителя в оптическом тракте сигнал поступает

на усилитель (первый каскад) и, далее, на фильтр низких частот Баттерворта [22].

На рис. 3 представлены графики выходного напряжения детектора после усиления и фильтрации. Запись произведена с помощью цифрового осциллографа АК ИП-72204А (<https://prist.ru/manufacturers/akip/>). На верхней панели рис. 3 представлен данные, полученные за несколько часов наблюдений. Отчетливо видна огибающая сигнала, полученная в измерениях без использования полосовых фильтров. Ее тенденция к расширению связана с влиянием температурного эффекта на величину выходного сигнала ОАП. Также на данном графике показаны временные интервалы, на которых макет одиночного канала работает с установленными полосовыми фильтрами (интервалы *a*, *b*, *c* на верхней панели рис. 3). Рассмотрим более подробно переходные процессы, происходящие при установке фильтров (рис. 3, нижняя панель). С 15.09.09 до 15.09.10 установка

работает без полосового фильтра на фоновом излучении. Начиная с 15.09.10 до 15.09.11 производится установка полосового фильтра ВРФ-0.4. Далее, примерно в течении 2 с аппаратура приходит в термостабильное состояние. Переменная составляющая выходного напряжения ОАП является искомым полезным сигналом. Данные вариации ( $100 \pm 10$  мс) с амплитудой  $200 \pm 20$  мВ обусловлены модуляцией потока излучения вращающимся прерывателем входного сигнала (чоппера).

Временная стабильность и чувствительность детектора была проверена с помощью калибровки детекторов Голея GC-CS специальной аппаратурой (излучатель, работающий в диапазоне температур  $0-100^\circ\text{C}$ , <http://www.tydexoptics.com/>).

Также было проведены измерения температурных зависимостей отклика ОАП на разных частотах. Измерения проводились в течение 190 ч. Использовался датчик температуры с точностью измерения температуры  $0.1^\circ\text{C}$ . Были проведены фоновые измерения и измерения, с использованием излучателя в диапазоне температур  $60-100^\circ\text{C}$  с шагом в  $10^\circ\text{C}$ . Каждое измерение проводилось при трех характерных частотах, модулирующих излучение: 10 и 15 Гц.

Интенсивность принимаемого излучения считается постоянной, таким образом уровень выходного сигнала ОАП зависит только от температуры. В качестве значения выходного сигнала был взят модуль разности близлежащих точек максимума и минимума квазисуносидального сигнала ОАП.

Температурная зависимость выходного сигнала ОАП аналитически может быть определена уравнением (1):

$$U(T) = U(T_0) + k\Delta T, \quad (1)$$

где  $U(T)$  – величина выходного сигнала ОАП при температуре  $T$ , В;  $U(T_0)$  – величина выходного сигнала ОАП при температуре  $T_0$ , В;  $k$  – температурный коэффициент, В/ $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T$  – разность температур  $(T - T_0)$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Методом регрессионного анализа экспериментальных данных были получены значения коэффициента  $k$ . Например, для фильтра на 3 ТГц, при частоте оптического прерывателя 10 Гц:  $k = 0.179$  В/ $^\circ\text{C}$ , а при частоте 15 Гц:  $k = 0.195$  В/ $^\circ\text{C}$ .

В будущем запланировано проведения калибровочных испытаний с излучателем, обеспечивающим диапазон температур от 100 до  $1200^\circ\text{C}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование характеристик ОАП (ячейки Голея) и детектирующего канала в сборе. Результаты измерений показали, что данный тип приемника электромагнитного излучения удо-

влетворяет требованиям планируемого терагерцового эксперимента.

Будущие экспериментальные наблюдения терагерцового излучения необходимы для изучения физической природы процессов ускорения заряженных частиц в солнечных активных областях и других астрофизических объектах. Следует отметить, что создаваемая научная аппаратура “Солнце-Терагерц” может быть полезной при разработке будущей экспериментальной базы “терагерцовых” исследований не только Солнца, но и планет Солнечной системы и других различных космических объектов (астероидов, комет и др.). Разрабатываемая научная аппаратура, при соответствующей модификации, будет полезна и для изучения активных процессов в земной атмосфере, на поверхности Земли и в ее недрах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akabane K., Nakajima H., Ohki K. et al. A flare-associated thermal burst in the mm-wave region // *Solar Physics*. 1973. V. 33. P. 431–437.
2. Duncan N., Saint-Hilaire P., Shih A. Y. et al. First flight of the Gamma-Ray Imager/Polarimeter for Solar flares (GRIPS) instrument // *Proceedings of the SPIE*. 2016. V. 9905. id. 99052Q 17.
3. Kaufmann P., Raullin J.-P., de Castro C.G.G. et al. A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range // *Astrophysical J*. 2004. V. 603. P. L121–L124.
4. Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R. et al. Solar burst with millimeter-wave emission at high frequency only // *Nature*. 1985. V. 313. P. 380–382.
5. Kaufmann P., Marcon R., Abrantes A. et al. THz photometers for solar observations from space // *Experimental Astronomy*. 2014. V. 37. P. 579–598.
6. Kaufmann P. Submillimeter/IR solar bursts from high energy electrons // *AIP conference Proceedings*. 1996. V. 374. P. 379–392.
7. Kaufmann P., Costa J.E.R., Gimenez de Castro et al. The new submillimeter-wave solar telescope // *Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*. IEEE. 2001. P. 439–442.
8. Kaufmann P., Gimenez de Castro, Makhmutov V. et al. Launch of solar coronal mass ejections and submillimeter pulse bursts // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108(A7). P. 1280.
9. Krucker S., Gimenez de Castro C.G., Hudson H.S. et al. Solar flares at submillimeter wavelengths // *Astron Astrophys Review*. 2013. V. 21. P. 58.
10. Luthi T., Magun A., Miller M. First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 415. P. 1123–1132.
11. Luthi T., Ludi A., Magun A. Determination of the location and effective angular size of solar flares with a 210 GHz multibeam radiometer // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 420. P. 361–370.

12. *Makhmutov V., Raulin J.-P., Giménez de Castro C. et al.* Wavelet Decomposition of Submillimeter Solar Radio Bursts // *Solar Physics*. 2003. V. 218. P. 211–220.
13. *Makhmutov V., Kurt V., Yushkov B.Y. et al.* Spectral peculiarities of high energy X-ray radiation, gamma radiation, and Submillimeter radio emission in the impulsive phase of a solar flare // *Bulletin of the Russian Academy of Science: Physics*. 2011. V. 75. P. 747–750.
14. *Marcon R., Kaufmann P., Fernandes T. et al.* Terahertz photometer to observe solar flares continuum // *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2012. V. 33. P. 192–203.
15. *Melo A., Kornberg M., Kaufmann P. et al.* Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies // *Applied Optics*. 2008. V. 47. № 32.
16. *Melo A., Kaufmann P., Kudaka A.S. et al.* A New Setup for Ground-based Measurements of Solar Activity at 10 mm // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2006. V. 118. P. 1558–1563.
17. *Raulin J.-P., Pacini A. A.*, Solar radio emissions // *Advances in Space Research*. 2005. V. 35.
18. *Гомон Д.А., Соболева В.Ю., Демченко П.С. и др.* Перестраиваемые терагерцовые фильтры на основе углеродных нанотрубок // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 5. С. 775–782.
19. *Краус Дж.Д.* Радиоастрономия. М: Изд-во Сов. радио, 1973.
20. *Кропотов Г.И., Кауфманн П.* Терагерцевые фотометры для наблюдений солнечных вспышек из космоса // *Фотоника*. 2013. № 5/41. С. 40–50.
21. *Фолкенберри Л.* Применение операционных усилителей и линейных ИС. М.: Мир, 1985.
22. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники в 2-х томах. М.: Мир, 1983.