_ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, ____ МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 629.785

ТЕЛЕСКОП ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СОЛНЦА НА МАЛОРАЗМЕРНЫХ АППАРАТАХ ТИПА КУБСАТ

© 2022 г. А. А. Перцов^{*a,b*}, С. Ю. Дятков^{*a,b*}, Н. Ф. Ерхова^{*a*}, А. А. Холодилов^{*a*}, Д. В. Лыков^{*a*}, А. А. Трушина^{*a*}, В. И. Червинский^{*a*}, Ф. В. Фатеев^{*a*}, А. В. Греков^{*a*}, А. В. Трифонов^{*a*}, И. П. Лобода^{*a*}, С. А. Богачев^{*a,b*,*}, А. С. Кириченко^{*a,b*}

^a Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53 ^b Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34 *e-mail: bogachev.sergey@gmail.com Поступила в редакцию 14.10.2021 г.

После доработки 26.10.2021 г. Принята к публикации 28.10.2021 г.

Разработан и реализован в виде наземного макета малоразмерный космический телескоп, предназначенный для получения изображений Солнца на аппаратах типа кубсат. Для инструмента предложена и исследована компактная оптическая двухзеркальная схема, обеспечивающая построение высокоточных изображений с угловым разрешением лучше 4" в коротковолновой области солнечного спектра, где лежит основное излучение активных солнечных процессов. Проведено моделирование качества изображений, получение и исследование которых экспериментальным способом в наземных условиях недоступно. Подтверждена возможность прибора регистрировать основные явления солнечной активности — вспышки и эруптивные протуберанцы.

DOI: 10.31857/S0032816222020057

Малые космические аппараты (м.к.а.), прежде всего спутники нанокласса (с массой от 1 до 10 кг), являются привлекательной альтернативой традиционным космическим платформам благодаря своей низкой стоимости, простоте вывода на орбиту (обычно в виде попутной нагрузки), а также коротким срокам изготовления. Особенно быстро развиваются коммерческие приложения таких аппаратов, в частности, для дистанционного зондирования Земли из космоса, а также для задач связи.

В области фундаментальной науки сфера применения таких платформ пока ограничена, поскольку при уменьшении массы и размера прибора, как правило, снижаются и его научные характеристики, соответственно снижается ценность получаемых им научных данных. Так, среди аппаратов стандарта кубсат, согласно обзору [1], по состоянию на 2017 г. из 1200 спутников, выведенных на орбиту к тому времени, только около 130 были предназначены для проведения научных исследований.

Одной из основных областей применения больших космических обсерваторий является гелиофизика, т.е. наблюдения Солнца. Интерес к этой области связан с существенным влиянием Солнца на околоземное космическое пространство, а также на атмосферные процессы на Земле. Кроме того, представляет интерес изучение Солнца как звезды, т.е. наблюдение вблизи типичного объекта звездного населения нашей Галактики.

В настоящее время сделаны первые попытки по переносу части научных экспериментов с больших обсерваторий на малоразмерные космические платформы. Приведем информацию о некоторых из них.

Среди действующих аппаратов одной из наиболее известных является серия малых аппаратов MinXSS (Miniature X-ray Solar Spectrometer – миниатюрный рентгеновский солнечный спектрометр [2]), разработанных НАСА. Аппараты относятся к наноклассу и построены по стандарту кубсат 3U с размером $34 \times 10 \times 10$ см. Измерительным прибором спутников MinXSS является рентгеновский спектрометр на основе SDD-детектора (Silicon Drift Detector – дрейфовый кремниевый детектор), работающий в диапазоне энергий 0.5-30 кэВ со спектральным разрешением 0.137 кэВ. Основным источником излучения в данном диапазоне является высокотемпературная плазма, формирующаяся в крупных структурах солнечной короны [3, 4], а также в малоразмерных горячих точках [5]. Прибор на спутнике MinXSS-1 [6] был запущен с МКС 16 мая 2016 г. и успешно передавал данные в течение 12 месяцев до входа в земную атмосферу. Спутник MinXSS-2 [4] с аналогичным инструментом был запущен 3 декабря 2018 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту, что позволило существенно увеличить объем передаваемых данных с 1 до 8 Мбайт в сутки. Планируемая продолжительность работы MinXSS-2 составляла 2 года, однако 7 января 2019 г. связь с аппаратом была потеряна из-за отказа бортовой электроники. Таким образом, на настоящий момент оба аппарата не функционируют.

Гелиофизический прибор близкого назначения был создан совместно МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН и запущен 28 сентября 2020 г. на малом космическом аппарате Ярило № 1 в качестве попутной нагрузки к аппаратам связи "Гонец-М". Измерения излучения Солнца осуществлялись SDD-детектором в мягком рентгеновском диапазоне 0.5–15 кэВ со спектральным разрешением 130 эВ [7]. Хотя аппарат все еще работает на орбите, научная информация с прибора по состоянию на текущий момент недоступна.

Еще один компактный прибор для регистрации рентгеновского излучения Солнца был выведен на орбиту 17 августа 2021 г. на борту малого аппарата Sunstorm. Аппарат типоразмера кубсат имеет формат 2U и массу 2 кг [8]. Рентгеновский детектор для прибора разработан компанией ISAWARE. Хотя сама концепция прибора не является новой, при его разработке были использованы некоторые новые технологии, в частности исключительно компактный (около 1 мм) SDDдиод, позволяющий регистрировать без перенасыщения даже наиболее мощные солнечные вспышки. По состоянию на настоящий момент прибором зарегистрировано несколько спектров Солнца.

Среди проектируемых аппаратов следует отметить аппарат CubIXSS (CubeSat Imaging X-ray Solar Spectrometer – изображающий рентгеновский солнечный спектрометр для спутников формата кубсат [9]), который представляет собой наноспутник размера 6U ($34 \times 20 \times 10$ см). Аппарат CubIXSS включает в себя два научных прибора: спектрометр SASS (Small Assembly for Solar Spectroscopy - малый солнечный спектрометр) на основе SDD-детектора для измерения спектров Солнца в диапазоне 0.5–50 кэВ и изображающий спектрометр MOXSI (Multi-Order X-ray Spectral Imager – разнопорядковый рентгеновский изображающий спектрометр), представляющий собой пинхол-камеру с пропускающей дифракционной решеткой для наблюдения Солнца в диапазоне 0.1-10 кэВ. Запуск аппарата назначен на 2023-2024 гг.

Таким образом, в настоящий момент отработаны, в том числе в ходе реальных космических полетов, технологии и методы регистрации спектров Солнца с использованием аппаратов нанокласса. Вместе с тем основным источником информации о солнечной активности являются в наши дни фотографии Солнца, полученные космическими телескопами в вакуумной ультрафиолетовой (у.ф.) области спектра (длина волны порядка 10-100 нм). В частности, на новейшей солнечной обсерватории HACA SDO (Solar Dynamics Observatory) установлено сразу 4 телескопа, получающих фотографии Солнца в восьми различных областях спектра [10]. Аналоги такой аппаратуры для спутников нанокласса ранее не обсуждались и не проектировались.

В настоящей работе мы представляем результаты разработки малоразмерного солнечного телескопа, показывающие возможность создания такого инструмента. Нами определена и оптимизирована оптическая схема инструмента, а также проработан его общий облик. Создан макет оптико-электронного тракта прибора. Продемонстрирована возможность экспериментального применения инструмента для регистрации основных типов активных солнечных процессов – вспышек и выбросов массы.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

В двумерном виде оптическая схема инструмента показана на рис. 1. Изображение сформировано в оптической программе Zemax OpticStudio 14.2 SP3. Система состоит из двух зеркал: главного (1), имеющего форму кольца с центральным отверстием, и вторичного (2). Свет от Солнца, которое считается бесконечно удаленным источником, проникает во входное окно, расположенное слева, и после отражения от главного зеркала собирается на вторичном зеркале, после чего фокусируется на поверхности детектора, проникая туда через центральное отверстие главного зеркала. Данная схема является одной из наиболее распространенных в области физики Солнца. В частности, такая же система используется в солнечных телескопах AIA, размещенных на спутнике SDO (HACA, [10]). В 2009 г. телескопы ТЕСИС, созданные по такому же принципу, работали в составе российской космической обсерватории КОРОНАС-Фотон [11, 12].

Расчет оптической схемы проводился из следующих основных соображений: угловое разрешение оптической системы не хуже 5" (допускается ухудшение качества во внешней зоне детектора за пределами изображения солнечного диска); возможность создания на основе этой схемы инструмента с размерами не более 2U (10 × 10 × 20 см) в терминах аппаратов типа кубсат.



Рис. 1. Принципиальная оптическая схема телескопа. *I* – входная апертура телескопа; *2* – главное зеркало; *3* – вторичное зеркало; *4* – детектор.

Результаты расчета — общие характеристики оптической системы, расстояния между оптическими элементами и параметры зеркал — представлены в табл. 1, 2 и 3.

Расстояние между вершинами зеркал, согласно расчетам, составляет 149.576 мм. При конструировании инструмента это расстояние дополнительно увеличится за счет размещения детектора (расстояние от вершины главного зеркала до плоскости детектора равно 15.9 мм), а также переднего узла (фильтр и крышка, расстояние от вершины вторичного зеркала до входной апертуры равно 33.0 мм). Полный размер — от входной апертуры до детектора, таким образом, составит 198.5 мм. Поперечный размер инструмента определяется диаметром главного зеркала (72 мм) и диаметром входной апертуры (около 77 мм). Таким образом, продольные и поперечные размеры оптической схемы не превышают заданных при расчете ограничений 2U (10 × 10 × 20 см). Поле зрения инструмента составляет 2°, что приблизительно равно четырем солнечным диаметрам. Расчетное угловое разрешение – 3.52". Поскольку эффективное фокусное расстояние системы составляет ~38 см, реализация прибора с такими характеристиками в однозеркальном исполнении при ограничении габаритов 2U невозможна.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИНСТРУМЕНТА

На основе проведенных оптических расчетов создана конструкторская модель телескопа, которая демонстрирует возможность технической реализации научного солнечного телескопа в заданных габаритных ограничениях (2U). Общий вид конструкции показан на рис. 2.

Форм-фактор телескопа соответствует стандарту кубсат 2U.

Прибор состоит из переднего узла, силовой конструкции и заднего узла. Передний узел образован тремя принципиальными элементами: вторичным зеркалом, входным фильтром и крыш-



Рис. 2. Общий вид проработанной конструкции. 1 – передний узел (крышка, входной фильтр и вторичное зеркало); 2 – силовая рамочная конструкция с посадочными элементами; 3 – фильтр и сетка фильтра; 4 – главное зеркало; 5 – плата детектора с разъемами; 6 – обшивка.

кой. Вторичное зеркало и фильтр на рис. 2 не показаны, так как скрыты за входной крышкой. Последняя защищает тонкопленочный фильтр от повреждений во время наземной транспортировки и при выведении м.к.а. на орбиту. Силовая конструкция прибора представляет собой ферму из металлических направляющих, обшитых листами металла. Поперечные направляющие и обшивка изготовлены из титана, продольные направляющие — из инварного сплава на основе титана, что снижает влияние перепадов температуры конструкции при работе в космосе на качество изображения. Задний узел телескопа включает в себя главное зеркало, вторичный фильтр, узел детектора и радиатор.

Таблица 1. Основные параметры оптической системы

Параметр	Величина
Диаметр апертуры главного зеркала, мм	68.0
Полное поле зрения:	
вписанное	$2.00^{\circ} = 120.0'$
невиньетированное	2.83° = 169.7'
Число пикселей матрицы	2048
Размер пикселя матрицы, мкм	6.5
Угловое разрешение	3.52"
Эффективное фокусное расстояние, мм	381.32
Размер матрицы, мм:	
сторона	13.31
диагональ	18.83

Расстояния	Величина, мм
Между вершинами зеркал	149.576
От вершины главного зеркала до плос-	
кости детектора:	
без дефокусировки	15.892
с дефокусировкой	15.832
От вершины вторичного зеркала до	33.0
входной апертуры	
От входной апертуры до плоскости	198.5
детектора	
От входной апертуры до вершины	182.6
главного зеркала	

Таблица 2. Расстояния между оптическими элементами

Таблица 3. Параметры зеркал

Параметр	Величина
Радиус кривизны, мм:	
главного зеркала	528.476
вторичного зеркала	746.865
Коническая константа:	
главного зеркала	-1.736
вторичного зеркала	-89.008
Эксцентриситет:	
главного зеркала	1.318
вторичного зеркала	9.434

Особенностью проведения наблюдений Солнца в вакуумной у.ф.-области спектра являются малые потоки излучения, которые составляют порядка 10⁻⁵ от потока излучения Солнца в видимой области спектра. Детектор излучения (используется к.м.о.п. (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) детектор с обратной засветкой GPIXEL 400BSI) имеет чувствительность в обоих диапазонах. По этой причине в приборе осуществляется отсечение оптического излучения с помощью тонкопленочных многослойных фильтров на основе комбинации Mg/Sc/SiC (см. также [13]). Пропускание фильтров настроено на длину волны 30.4 нм, соответствующую интенсивному излучению иона гелия He-II, высокое содержание которого наблюдается в нижней атмосфере Солнца. В связи с высокой чувствительностью фильтров к нагрузкам (прежде всего, к акустическому воздействию) они размещаются на поддерживающих сетках. В конструкцию входят два фильтра (входной и вторичный), что повышает надежность, а также увеличивает спектральный контраст изображения.

Тип детектора может быть выбран из двух принципиальных вариантов — п.з.с. (прибор с зарядовой связью) и к.м.о.п. В современных солнечных обсерваториях применяются, главным образом, п.з.с.-детекторы. В то же время технология к.м.о.п. имеет ряд существенных преимуществ, основными из которых являются возможность считывания сигнала с произвольного участка детектора, а также возможность регулирования экспозиции электронными средствами без применения механических затворов.

Прибор оснащен радиатором для лучистого охлаждения детектора и платы электроники. Размеры радиатора составляют 10 × 10 см и определены исходя из стандарта кубсат. Точный тепловой расчет в рамках данной работы не проводился, так как для малых аппаратов распределение температур чувствительно к режимам эксплуатации в космосе, которые не могут быть однозначно определены.

Характеристики прибора приведены ниже:

– Размеры, см	$10 \times 10 \times 20$
– Размеры, см	$10 \times 10 \times 20$

– Масса, кг			1.5
-	_	-	_

– Энергопотребление, Вт 5

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Качество оптической системы было исследовано в терминах радиуса RMS (среднеквадратическая величина радиального размера пятна рассеяния), а также в терминах радиуса GEO. Величина GEO представляет собой расстояние от центра тяжести всех трассированных лучей (опорная точка) до луча, наиболее удаленного от этой опорной точки. Проще говоря, размер пятна GEO – это радиус круга с центром в опорной точке, в пределы которого попадают все лучи.

Соответствующие значения приведены в табл. 4.

Поскольку размер пикселя детектора составляет 6.5 мкм, в пределах угла ±0.625° (±2.5 солнечного радиуса) оптическое качество изображения лучше одного пикселя. Ухудшение качества изображения по сравнению с пиксельным разрешением возникает лишь на краях детектора за пределами изображения солнечного диска.

Используя указанные данные, мы промоделировали изображения солнечного диска и сравнили с изображениями, предоставляемыми обсерваторией HACA SDO с угловым разрешением 0.6" на пиксель.

Пример моделирования показан на рис. 3. Демонстрируется эруптивный протуберанец в короне Солнца. Несмотря на отсутствие тонких деталей, модельное изображение содержит полную информацию для детектирования явления, определения пространственной структуры и изучения его динамики. При этом последнее изображение получено инструментом, имеющим примерно в 20 раз меньший вес и энергопотребление и несравненно более низкую стоимость.

ПРОВЕДЕНИЕ МАКЕТИРОВАНИЯ

Для исследования характеристик инструмента был создан наземный габаритный макет, включающий в себя элементы оптико-электронного тракта. Общий вид макета показан на рис. 4а.

Сопряжение элементов конструкции осуществлялось винтами, а также с применением лазерной сварки. Обработка поверхности (анодирование) для сокращения стоимости не проводилась. С целью экспериментальной проверки соответствия выбранного способа организации силовой конструкции требованиям по выводу аппарата на орбиту макет был испытан на вибропрочность к линейным (10 g в направлении оптической оси телескопа и 5 g в каждом из поперечных направлений) и гармоническим нагрузкам в диапазоне частот до 20 Гц, перечисленным в табл. 5. Проверка прочности конструкции проводилась визуальным осмотром, а также оптическими

Смещение от центра, градус	Радиус RMS, мкм	Радиус GEO, мкм
0.000	4.919	6.314
0.125	4.708	6.203
0.250	4.089	5.882
0.375	3.190	5.326
0.500	2.454	4.515
0.625	3.100	4.625
0.750	5.233	9.198
0.875	8.199	14.545
1.000	11.760	21.061

Таблица 4. Радиусы RMS и GEO как функции углового

средствами (измерением фокусного расстояния прибора до и после нагрузок).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Солнечная активность является основной причиной изменения радиационного состояния



Рис. 3. Изображение солнечного диска с эруптивным протуберанцем в короне Солнца, полученное: **а** – экспериментальным путем с помощью телескопа AIA на аппарате SDO; **б** – по результатам моделирования малоразмерного телескопа.

Рис. 4. Габаритный макет с элементами оптико-электронного тракта для наземных испытаний прибора: а — общий вид макета; б — способ организации силовой конструкции прибора.



Амплитуда виброускорения, м/с ² (g), в поддиапазонах частот, Гц				Время лействия с
1-2	2-5	5-10	10-20	bpenn generbin, e
2.94-4.9 (0.3-0.5)	4.9 (0.5)	4.9-9.8 (0.5-1.0)	9.8 (1.0)	600

3.92-4.9 (0.4-0.5)

Таблица 5. Режимы стационарных вибрационных воздействий для гармонической вибрации в диапазоне частот до 20 Гц

ближнего околоземного пространства и поэтому активно исследуется, в том числе космическими средствами. Подготовка крупных космических экспериментов, как правило, занимает значительное время. Так, в Японии при реализации программы солнечных исследований обсерватория Solar-A (Yohkoh) была запущена в 1991 г., а следующая обсерватория Solar-В (Hinode) только в 2006 г. Обсерватория Solar-С планируется к запуску не ранее 2025 г. В Российской Фелерации последняя солнечная обсерватория КОРО-НАС-Фотон закончила работу в 2009 г., и с тех пор новых аппаратов не запускалось. В этих условиях отсутствие данных по солнечной активности может быть восполнено за счет малых космических платформ. Хотя качество данных, регистрируемых такими приборами, может быть ниже, чем их аналогов на больших обсерваториях, существенно более низкая стоимость, а также малые сроки разработки компенсируют эти недостатки.

2.94-3.92 (0.3-0.4)

По состоянию на настоящий момент достигнут определенный прогресс по переносу на малые платформы приборов для регистрации спектров Солнца в рентгеновском диапазоне. При этом отсутствуют разработки в области создания малоразмерных солнечных телескопов, являющихся основным современным способом регистрации активных процессов на Солнце.

Нами предложена и экспериментально отработана конструкция малоразмерного телескопа, предназначенного для установки на платформы формата кубсат с размером от 2U и выше. Показано, что при достаточно жестких ограничениях на размер ($10 \times 10 \times 20$ см) и массу (1.5 кг) возможно достигнуть углового разрешения наблюдений лучше 4" в пределах всего наблюдаемого диска Солнца, что соответствует структурам размером около 2500 км. Такая точность достаточна для регистрации всех основных типов солнечной активности, за исключением микро- и нановспышек (объекты с характерным размером порядка 1000 км, см., например, [14, 15]). Поскольку одной из основных проблем при создании приборов малого размера является обеспечение их прочности, достаточной для вывода на орбиту, были проведены экспериментальные исследования габаритного макета прибора с имитатором оптико-электронного тракта. Проведенные испытания на вибропрочность подтвердили достаточную жесткость выбранной конструкции.

1350

4.9 (0.5)

Создание летного прибора и проведение эксперимента в космосе возможны в период 2022– 2023 гг. в рамках программы запуска малых космических аппаратов "УниверСат" Российского космического агентства.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа частично (в части создания и испытания макета) выполнена в рамках проекта FSSS-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. NAS. Engineering and Medicine. Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box. Washington, DC, USA: The National Academies Press, 2016. https://doi.org/10.17226/23503
- Moore C.S., Caspi A., Woods T.N., Chamberlin P.C., Dennis B.R., Jones A.R., Mason J.P., Schwartz R.A., Tolbert A.K. // Solar Physics. 2018. V. 293. № 2. P. 1. https://doi.org/10.1007/s11207-018-1243-3
- Grechnev V.V., Kuzin S.V., Urnov A.M., Zhitnik I.A., Uralov A.M., Bogachev S.A., Livshits M.A., Bugaenko O.I., Zandanov V.G., Ignat'ev A.P., Krutov V.V., Oparin S.N., Pertsov A.A., Slemzin V.A., Chertok I.M., Stepanov A.I. // Solar System Research. 2006. V. 40. № 4. P. 286. https://doi.org/10.1134/S0038094606040046
- Reva A., Shestov S., Zimovets I., Bogachev S., Kuzin S. // Solar Physics. 2015. V. 290. № 10. P. 2909. https://doi.org/10.1007/s11207-015-0769-x
- Reva A., Shestov S., Bogachev S., Kuzin S. // Solar Physics. 2012. V. 276. № 1. P. 97. https://doi.org/10.1007/s11207-011-9883-6
- Mason J.P., Woods T.N., Caspi A., Chamberlin P.C., Moore C., Jones A., Kohnert R., Li X., Palo S., Solomon S. Preprint arXiv: 1508.05354. 2015. https://doi.org/10.2514/1.A33351
- 7. Гончаров Н.В., Корецкий М.Ю., Майорова В.И., Мельникова В.Г., Неровный Н.А., Рачкин Д.А., Тененбаум С.М., Тимакова Е.Д., Фролов К.А., Ястребова И.В., Богачев С.А., Дятков С.Ю., Кириченко А.С., Кузин С.В., Перцов А.А. // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 1 (100). С. 69.

1.96-2.94 (0.2-0.3)

- 8. Sunstorm (XFM Cube, XFM CubeSat). URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sunstorm.htm
- Caspi A., Shih A.Y., Warren H., DeForest C., Laurent G.T., Schwartz R.A., Woods T.N., Mason J., Palo S., Steslicki M., Sylwester J., Gburek S., Mrozek T., Kowalinski M., Torre G. et al. // American Astronomical Society. 48th SPD Meeting. Portland, Oregon, August, 2017. id.305.03
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., Boerner P.F., Chou C., Drake J.F., Duncan D.W., Edwards C.G., Friedlaender F.M., Heyman G.F., Hurlburt N.E., Katz N.L., Kushner G.D., Levay M., Lindgren R.W. et al. // Solar Physics. 2012. V. 275. P. 17. https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8
- 11. Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Shestov S.V., Bogachev S.A., Bugaenko O.I., Ignat'ev A.P., Pertsov A.A., Ulyanov A.S., Reva A.A., Slemzin V.A., Sukhodrev N.K., Ivanov Yu.S., Gon-

charov A.L., Mitrofanov A.V., Popova S.G. et al. // Solar

System Research. 2011. V. 45. № 2. P. 162. https://doi.org/10.1134/S0038094611020110

- Kuzin S.V., Bogachev S.A., Zhitnik I.A., Pertsov A.A., Ignatiev A.P., Mitrofanov A.V., Slemzin V.A., Shestov S.V., Sukhodrev N.K., Bugaenko O.I. // Advances in space research. 2009. V. 43. № 6. P. 1001. https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.021
- Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Shestov S.V., Zuev S.Yu. // Applied Optics. 2016. V. 55. № 9. P. 2126. https://doi.org/10.1364/AO.55.002126
- Богачев С.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С., Лобода И.П., Рева А.А. // Успехи физических наук. 2020. Т. 190. № 8. С. 838. https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038769
- Kirichenko A.S., Bogachev S.A. // Solar Physics. 2017. V. 292. № 9. P. 1. https://doi.org/10.1007/s11207-017-1146-8