
МНОГОВОЛНОВЫЙ СИБИРСКИЙ РАДИОГЕЛИОГРАФ MULTIWAVE SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH

А.Т. Алтынцеv

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru*

С.В. Лесовой

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, svlesovoi@gmail.com*

М.В. Глоба

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, globa@iszf.irk.ru*

А.В. Губин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, gubin@iszf.irk.ru*

А.А. Кочанов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kochanov@iszf.irk.ru*

В.В. Гречнев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, grechnev@iszf.irk.ru*

Е.Ф. Иванов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, eugenessrt@gmail.com*

В.С. Кобец

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kobets@iszf.irk.ru*

Н.С. Мешалкина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru*

А.А. Муратов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mutolya@mail.ru*

Д.В. Просовецкий

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, proso@iszf.irk.ru*

И.И. Мышьяков

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivan_m@iszf.irk.ru*

А.М. Уралов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, uralov@iszf.irk.ru*

А.Ю. Федотова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, fedotovanastya@iszf.irk.ru*

A.T. Altyntsev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru*

S.V. Lesovoi

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, svlesovoi@gmail.com*

M.V. Globa

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, globa@iszf.irk.ru*

A.V. Gubin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, gubin@iszf.irk.ru*

A.A. Kochanov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kochanov@iszf.irk.ru*

V.V. Grechnev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, grechnev@iszf.irk.ru*

E.F. Ivanov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, eugenessrt@gmail.com*

V.S. Kobets

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kobets@iszf.irk.ru*

N.S. Meshalkina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru*

A.A. Muratov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mutolya@mail.ru*

D.V. Prosovetsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, proso@iszf.irk.ru*

I.I. Myshyakov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivan_m@iszf.irk.ru*

A.M. Uralov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, uralov@iszf.irk.ru*

A.Yu. Fedotova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, fedotovanastya@iszf.irk.ru*

Аннотация. В статье обсуждаются характеристики, фундаментальные и прикладные задачи создаваемого на площадке Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН Сибирского радиогелиографа и комплекса спектрополяриметров интегрального потока излучения Солнца. Многоволновое картографирование Солнца в микроволновом диапазоне является мощным и относительно недорогим по сравнению с космическими технологиями средством слежения за процессами солнечной активности и средством диагностики параметров плазмы. Всепогод-

Abstract. The article discusses characteristics, fundamental and applied tasks of the Siberian Radioheliograph that is developed at the ISTP SB RAS Radio Astrophysical Observatory and spectropolarimetric complex that measures the total flux of solar radio emission. The multi-wave mapping of the Sun in the microwave range is a powerful and relatively inexpensive, in comparison with space technologies, means of observing solar activity processes and diagnosing plasma parameters. All-weather monitoring of electromagnetic solar emission (in the range from meter to millimeter waves,

ный мониторинг электромагнитного солнечного излучения в диапазоне от метровых до миллиметровых волн, включая измерения индекса солнечной активности на частоте 2.8 ГГц, причем в месте расположения других разнообразных диагностических средств Гелиогеофизического комплекса, имеет особую ценность. Данные радиогелиографа необходимы для развития и реализации методов краткосрочного прогноза солнечных вспышек, измерений кинематических характеристик и параметров плазмы корональных выбросов массы, прогноза характеристик быстрых потоков солнечного ветра.

Ключевые слова: радиогелиограф, Солнце, магнитные поля, мониторинг, ускорение частиц.

including measurements of the solar activity index at 2.8 GHz), and at the location of other diverse diagnostic facilities of the Heliogeophysical Complex, is of particular value. Radioheliograph data is necessary to develop and implement methods of short-term forecast of solar flares, measurements of kinematics and characteristics of coronal mass ejection plasma, forecast of characteristics of fast solar wind streams.

Keywords: radioheliograph, Sun, magnetic fields, monitoring, particle acceleration.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное излучение и потоки плазмы Солнца являются доминирующими внешними факторами, определяющими изменчивость свойств околоземной среды, которая активно осваивается современными технологиями. Основные воздействия на околоземную среду связаны с рекуррентными структурами в солнечном ветре (быстрые потоки солнечного ветра из корональных дыр, области коротации быстрых и медленных потоков), ионизирующим излучением, потоками жесткого излучения солнечных вспышек, всплесками радиоизлучения, корональными выбросами массы (КВМ) и потоками солнечных энергичных частиц. Геоэффективные воздействия приводят к геомагнитным бурям, возмущениям ионосферы и нагреву атмосферы, что, в свою очередь, вызывает разнообразные практические следствия: токи в трубопроводах и электрических сетях, нарушения в гражданских и военных системах связи и навигации, электризацию поверхностей космических аппаратов, их торможение из-за разбухания атмосферы Земли и т. д.

На исследования процессов энерговыделения в солнечной атмосфере — как постепенного, приводящего к нагреву хромосферы и короны, так и спорадического, проявляющегося в форме солнечных вспышек и КВМ, — расходуются значительные материальные и интеллектуальные ресурсы. Непрерывный мониторинг солнечной активности в мягком рентгеновском излучении 1–8 Å осуществляется агентством NASA с помощью спутников GOES с 1977 г. Наблюдения Солнца проводятся с помощью космических аппаратов, из которых можно назвать SOHO [Domingo et al., 1995], STEREO-A [Kaiser et al., 2008], Hinode [Kosugi et al., 2007], SDO [Pesnell et al., 2012], IRIS [de Pontieu et al., 2014] и Parker Solar Probe [Fox et al., 2016]. Внеатмосферные наблюдения дополняются данными глобальной сети крупных наземных инструментов, специализирующихся на наблюдениях Солнца.

В радиодиапазоне непрерывный мониторинг активности Солнца осуществляется сетью радиотелескопов Radio Solar Telescope Network (RSTN) [Kennewell, 1998] и e-Callisto [Benz et al., 2009]. Радионаблюдения являются важным, а в некоторых задачах — уникальным источником информации о про-

цессах солнечной активности. С одной стороны, они позволяют проводить мониторинг и диагностику текущего состояния солнечной активности в широком диапазоне временных масштабов и исключительно большом динамическом диапазоне вариаций потоков излучения. С другой стороны, радиоизлучение Солнца несет информацию о природе источников активных излучений, необходимую для создания теории процессов импульсного энерговыделения на Солнце и развития алгоритмов их прогноза.

Рассмотрим основные факторы солнечной активности. КВМ тесно связаны со вспышками и инициируются дестабилизацией магнитных жгутов в нижней короне и их выбросом во внешнюю корону. Скорость выбрасываемой плазмы может превышать 3000 км/с, а кинетическая энергия выбросов сравнима с энергией мощных вспышек. КВМ могут приводить к наиболее мощным возмущениям магнитоплазменных оболочек Земли и появлению потоков солнечных космических лучей, ускоренных распространяющимися перед ними ударными волнами. В радионаблюдениях возможен мониторинг КВМ на фоне солнечного диска, причем с начала подъема магнитного жгута на стадии его ускорения. Важно, что в радиоизлучении возможно детектирование обеих популяций выбрасываемой плазмы — тепловой и ускоренной. Одной из фундаментальных задач понимания природы вспышек и КВМ является выяснение вклада в ускорение солнечных энергичных частиц процессов во вспышечной области в нижней короне и ударных волн, формирующихся на фронте КВМ на пути к Земле [Zhang et al., 2007; Grechnev et al., 2008, 2018; Chertok et al., 2015].

Наиболее динамичные процессы, определяющие возмущения околоземного пространства, происходят в короне Солнца. Солнечные вспышки генерируют мощные возрастания (на несколько порядков величины) потоков жесткого электромагнитного излучения и ускоренных частиц, что ухудшает радиационную обстановку в околоземном пространстве и представляет опасность для экипажей и обслуживания космических аппаратов. Интенсивное электромагнитное излучение и потоки частиц высоких энергий могут воздействовать на ионосферу непосредственно [Afraimovich et al., 2001, Tsurutani et al., 2009, Yasyukevich et al., 2018]. Радиоизлучение вспышек содержит два основных компонента. Пер-

вый, преимущественно на частотах ниже 3 ГГц, генерируется электронами с энергией десятки и сотни килоэлектронвольт когерентными механизмами, а второй компонент излучается электронами с энергиями до нескольких мегаэлектронвольт некогерентным гиросинхротронным механизмом.

Отдельно необходимо сказать о мощных солнечных всплесках, генерируемых когерентными механизмами в активных областях, ударных волнах и вспышках. Интенсивность их излучения может достигать 10^{-16} Вт/(м²·Гц) на Земле и приводить к сбоям в работе систем связи и навигации, засветкам радаров гражданского и военного назначения [Bala et al., 2002; Knipp et al., 2016; Marqué et al., 2018]. В частности, наблюдались события, в которых интенсивность излучения на частоте 2800 МГц (индекс F10.7) возрастала на два порядка относительно уровня спокойного Солнца [Cerruti et al., 2006]. В этой связи необходимо особо отметить генерацию в короне мощных узкополосных всплесков, так называемых спайков [Флейшман, Мельников 1998; Chernov, 2006; Treumann, 2006], в которых в узкой полосе поток излучения может внезапно возрасти на несколько порядков.

Электромагнитное излучение мощной солнечной вспышки в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах достигает окрестности Земли через восемь минут и приводит к внезапным ионосферным возмущениям и нарушениям радиосвязи длительностью от нескольких минут до нескольких часов. Период радиопомех может быть более десяти часов. Высыпание протонов в полярных областях сопровождается поглощением радиоволн в полярной шапке и потерями связи в течение нескольких суток. Эти факторы являются предвестниками магнитосферной бури.

Значительный вклад в возмущения околоземной среды могут вносить потоки быстрого ветра из корональных дыр в атмосфере Солнца и процессы в областях их взаимодействия с потоками медленного ветра. Радионаблюдения в микроволновом диапазоне позволяют выделять корональные дыры на солнечном диске и прогнозировать характеристики генерируемых потоков [Krieger et al., 1973; Tsurutani et al., 2006].

При исследовании процессов энерговыделения спокойного Солнца актуальна проблема нагрева короны и, в частности, определение источников излучения с длиной волны 10.7 см — ключевого индекса солнечной активности [Schonfeld et al., 2015].

Среди фундаментальных задач физики Солнца выделяется по важности магнитография корональных структур. В настоящее время не вызывает сомнения, что источником энергии динамичных процессов в солнечной короне является магнитное поле. Изменения фотосферных полей генерируют токи в короне и формируют неустойчивые магнитные структуры. Быстрая релаксация их непотенциальной энергии проявляется как импульсное энерговыделение. Заблаговременное выявление таких конфигураций и контроль их эволюции позволит предсказывать момент инициации эруптивных событий и их мощность.

Следует отметить, что величина и направление магнитного поля существенно влияют на характеристики микроволнового излучения. Поэтому перед мощными геоэффективными вспышками наблюдаются аномалии в распределениях микроволновых источников во вспышечно-продуктивных активных областях. Эти аномалии вызваны изменениями плотности плазмы и магнитного поля в процессе накопления непотенциальной энергии магнитных полей. Отличия распределений микроволновых источников во вспышечно-продуктивных активных областях от типичных конфигураций в спокойных областях позволили исследователям [Tanaka, Enome, 1975; Максимов и др., 1996; Smolkov et al., 2010] создать статистически оправданный алгоритм краткосрочного прогноза мощных вспышек. Развитие этого метода показало, что оправдываемость прогноза растет, если использовать данные об эволюции изображений активной области на нескольких частотах [Smolkov et al., 2009]. Метод опирается на относительно простые морфологические зависимости и может быть алгоритмизирован [Maksimov, Prosovetsky, 2005].

В работах [Uralov et al., 2006, 2008] было показано, что появление внепятенных квазистационарных источников над линией инверсии радиальной составляющей магнитного поля на радиокартах ССРТ и NoRH указывает на возможность инициации в их окрестности мощных рентгеновских вспышек. Появление таких источников связано с выходом нового магнитного потока в атмосферу активной области и формированием токового слоя — их связь с местами энерговыделения в короне подтверждена экспериментально.

Указания на возможность обнаружения токовых структур по данным о спектре микроволнового излучения активной области были получены в работе [Tokhchukova, Bogod, 2003]. Используя данные подробных наблюдений спектра излучения активных областей, полученные с помощью многочастотного приемника РАТАН-600, авторы выявили ряд новых эффектов, которые могут быть использованы при разработке алгоритмов прогноза вспышечно-продуктивности по радиоданным. В частности, было установлено, что предвестником вспышки является двукратное изменение знака поляризации в относительно узкой полосе спектра излучения вспышечно-продуктивной активной области [Кальтман и др., 2005]. На РАТАН-600 также развиваются методы краткосрочного прогноза мощных вспышек по особенностям структуры и динамики микроволновых источников [Абрамов-Максимов и др., 2014].

В последние десятилетия установлено, что с КВМ к Земле переносятся так называемые магнитные облака, направление магнитного поля в которых радиально влияет на геоэффективность возмущений солнечного ветра. Поэтому задача определения структуры магнитных полей в области формирования КВМ является ключевой не только для прогноза эрупции, но и для оценки уровня последующих возмущений магнитосферы Земли, т. е. для развития научных основ методов прогноза геомагнитной активности [Grechnev et al., 2014].

Оптическими методами не удастся измерять корональные магнитные поля, поскольку для этого необходимо выделять магнитоактивные линии излучения оптически тонкой короны на фоне яркого солнечного диска [Stenflo, 2010]. Солнечные телескопы нового поколения будут использовать инфракрасные корональные линии, однако и в этом случае измерения будут эффективными только над солнечным лимбом [Tritschler et al., 2016]. В настоящее время при интерпретации эруптивных событий используются методы расчета магнитных полей в потенциальном и нелинейном бессиловом приближении. В качестве наблюдаемых граничных условий используются магнитограммы, полученные в оптически толстых слоях фотосферы (см., например, [Rudenko, Myshyakov, 2009]). Данный подход может рассматриваться только в качестве первого приближения, поскольку в этом подходе исключаются токовые слои — ключевые элементы вспышечного энерговыделения — и не учитывается предыстория развития магнитной конфигурации.

Измерения магнитных полей в короне возможны по характеристикам радиоизлучения Солнца, поскольку вклад коронального излучения в этом диапазоне значителен в сравнении с излучением фотосферы и хромосферы [Akhmedov et al., 1982]. Методы радиомагнитографии основываются на хорошо развитой теории гирорезонансного и тормозного механизмов излучения, а также эффектов смены знака круговой поляризации при прохождении излучением областей с так называемыми квазипоперечными магнитными полями.

Необходимо учитывать, что измеренные радиоспектры включают вклад слоев излучения по лучу зрения с разной оптической толщиной. Поэтому для корректной интерпретации наблюдений корональных структур необходимо создание трехмерной модели источников, согласующейся со всеми имеющимися наблюдательными данными в различных диапазонах электромагнитного спектра, — не только в радиодиапазоне, но и в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах.

Перспективность регулярной диагностики магнитных полей активных областей с помощью многоволновых микроволновых наблюдений продемонстрирована в исследованиях по данным наблюдений на РАТАН-600 (см. [Кальтман и др., 2005; Kaltman et al., 2013, 2015] и ссылки там) с помощью спектрального комплекса с диапазоном приема от 0.756 до 18.2 ГГц, принимающего излучение одновременно на 112 частотных каналах. К сожалению, ножевая диаграмма направленности РАТАН-600 существенно ограничивает возможности корональной магнитографии по данным этого инструмента.

До настоящего времени диагностический потенциал радиометодов сдерживается отсутствием адекватного инструментария. В современных радиоастрономических наблюдениях Солнца основой должны являться данные многоволновых радиогелиографов, позволяющих измерять спектры радиоизлучения с пространственным разрешением, достаточным для выделения на изображениях Солнца основных элементов короны активных областей —

магнитных петель с размерами до нескольких угловых секунд. Временное разрешение должно обеспечивать регистрацию отдельных актов вспышечного энерговыделения с длительностью до секунды. Наблюдения на радиогелиографах должны дополняться данными спектрополяриметров интегрального излучения Солнца, которые используются для расширения частотного диапазона наблюдений при высоком спектральном разрешении.

Достижения электронных и компьютерных технологий последнего десятилетия открыли возможности создания радиотелескопов с необходимыми характеристиками. Концепция радиогелиографа FASR (Frequency Agile Solar Radiotelescope) с рекордными параметрами по пространственному, временному и частотному разрешению, предложенная учеными США в 1999 г. [Gary et al., 2001], вдохновила ученых Китая (Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER [Yan et al., 2009]) и России (Сибирский радиогелиограф, СРГ [Lesovoi et al., 2012]) на разработку подобных проектов, которые находятся сейчас на разных стадиях реализации. В США с использованием концепции FASR постепенно наращивается антенная решетка радиогелиографа Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA, [Gary et al., 2018a]).

Следует отметить также несколько современных радиотелескопов, которые эпизодически привлекаются для решения задач физики Солнца: Very Large Array (VLA, USA), Low Frequency Array (LOFAR), Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Появились первые многочастотные данные, получаемые с двумерным разрешением двумя новыми инструментами — прототипом СРГ [Лесовой и др., 2017] и EOVSA [Gary et al., 2018b]. Можно ожидать беспрецедентный рост использования микроволновой диагностики активных областей и солнечных вспышек, что приведет к качественно новому пониманию природы процессов солнечной активности.

В данной работе обсуждается Сибирский радиогелиограф, который создается в настоящее время в ИСЗФ СО РАН.

1. СИБИРСКИЙ РАДИОГЕЛИОГРАФ

Сибирский радиогелиограф (СРГ) создается по постановлению правительства РФ № 522 от 28 апреля 2018 г. на территории Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, что позволяет вести наблюдения на СРГ в комплексе с уже имеющимися инструментами и использовать инфраструктуру обсерватории (жилой фонд, средства связи, транспорт). Обсерватория находится в 220 км от Иркутска (51°45'33" N, 102°13'08" E). Выбор места для строительства обусловлен, прежде всего, уже имеющейся инфраструктурой Радиоастрофизической обсерватории и низким уровнем помех благодаря ее удаленности от крупных населенных пунктов.

Концепция и техническое задание СРГ разработаны под руководством А.Т. Алтынцева и С.В. Лесового в отделе радиоастрофизики ИСЗФ СО РАН. Сотрудники отдела обладают большим опытом эксплуатации и модернизации Сибирского солнечного

радиотелескопа (ССРТ) с 256-антенной решеткой с базой 622 м [Smolkov et al., 1986; Grechnev et al., 2003]. Радиокарты ССРТ на частоте 5.7 ГГц использовались при реализации многих российских и международных проектов по исследованию признаков вспышечной продуктивности активных областей и закономерностей нагрева короны над корональными дырами, где формируются скоростные потоки солнечного ветра и т. д. С помощью ССРТ получены новые знания о природе и кинематике КВМ, механизмах первичного энерговыделения и ускорения частиц в солнечных вспышках.

При разработке концепции определены следующие актуальные научные задачи, для решения которых будут использоваться наблюдения на СРГ:

- определение конфигурации и величин корональных магнитных полей в активных областях, вспышечных петлях, КВМ и атмосфере спокойного Солнца;
- диагностика характеристик магнитоплазмы и ускоренных частиц в областях энерговыделения;
- идентификация механизмов ускорения электронов, вспышечного нагрева плазмы и процессов переноса энергии в атмосфере Солнца;
- обнаружение и исследование волновых процессов и ударных волн в солнечной атмосфере;
- исследование эволюции крупномасштабных структур в атмосфере Солнца с временными масштабами порядка цикла солнечной активности;
- развитие методов индексирования солнечной активности по характеристикам радиоизлучения;
- разработка новых инструментальных средств мониторинга солнечной активности в радиодиапазоне.

Использование потенциала радионаблюдений в полном объеме требует детально проработанной методологии исследований, опирающейся на самые современные средства трехмерного моделирования, для которого необходимы данные наблюдений в других диапазонах (рентгеновском, ультрафиолетовом и т. д.), корректные методы реконструкции коронального магнитного поля, апробированные модели нагрева хромосферы и короны, оптимизированные методы быстрого вычисления параметров электромагнитного излучения.

Прикладные задачи, для решения которых будут использоваться данные СРГ и сопровождающих спектрополяриметров интегрального излучения Солнца:

- измерения индекса солнечной активности — радиоизлучения на длине волны 10.7 см;
- краткосрочный, за два-три дня, прогноз мощных солнечных вспышек;
- мониторинг радиоизлучения Солнца в широком диапазоне, включая частоты приема различных наземных средств, таких как радары, системы навигации и связи;
- диагностика геоэффективных параметров солнечных вспышек;
- предоставление оригинальных данных российским и международным центрам мониторинга солнечной активности.

1.1. Технические характеристики СРГ

СРГ представляет собой интерферометр, предназначенный для получения изображений Солнца

в полосе частот 3–24 ГГц в обоих направлениях круговой поляризации. Поле зрения радиогелиографа должно превышать размеры солнечного диска, что накладывает ограничения на диаметр отдельных антенн. Поэтому интерферометр состоит из трех независимых антенных решеток на диапазоны частот 3–6, 6–12, 12–24 ГГц (рис. 1) с диаметрами антенн 3, 1.8 и 1 м соответственно. Количество антенн в решетках составляет 129, 192, 207. Т-образные антенные решетки диапазонов 3–6 и 6–12 ГГц являются эквидистантными, а в решетке 12–24 ГГц интервал между крайними антеннами увеличен по сравнению с расстоянием между центральными антеннами.

Выбор избыточных Т-образных решеток обусловлен, во-первых, возможностью использования избыточности для калибровки коэффициентов передачи антенн в подобных решетках, и, во-вторых, требованием к высокой чувствительности радиогелиографа, необходимой для спектральных поляризационных измерений. При определении максимальной базы интерферометра учитывалось, что пространственное разрешение микроволновых солнечных наблюдений ограничивается рассеянием излучения на мелкомасштабных флуктуациях плазмы в короне [Bastian, 1994; Altynsev et al., 1996; Chashei et al., 2006]. Согласно этим работам, видимые размеры точечных солнечных источников на частоте около 6 ГГц составляют не менее 5 угл. сек.

Карты с более высоким пространственным разрешением будут доступны при исследовании ярких вспышечных источников с помощью китайского радиогелиографа MUSER в диапазоне принимаемых частот 0.4–15 ГГц, который создается в настоящее время во Внутренней Монголии [Yan et al., 2009]. При исследовании ярких вспышечных источников наблюдения СРГ, отличающиеся высокой чувствительностью и более высокими рабочими частотами, будут дополняться китайскими данными с более высоким пространственным разрешением (см. табл. 1).

Линии передачи сигнала от антенн к рабочему зданию выполняются на основе волоконно-оптических линий связи. Каждая линия содержит оптический передатчик, оптическое волокно и оптический приемник.

Приемные системы решеток независимы и состоят из аналоговой и цифровой частей. Задача аналоговой части — преобразование оптических сигналов от антенн в СВЧ-сигналы, их усиление и перенос на первую промежуточную частоту. Функции цифровой части приемной системы — преобразование сигнала в цифровой вид, формирование полосы частот, компенсация геометрической задержки, остановка бегущих интерференционных лепестков, формирование пары сигналов I , Q . Управление цифровыми приемниками осуществляется по локальной компьютерной сети.

Программы сбора/хранения данных радиогелиографа обеспечивают режим наблюдений по расписанию, заданному в конфигурационных файлах; предоставляют графический интерфейс оператору для диагностики состояния систем инструмента, контроля и управления режимами наблюдений; обеспе-



Рис. 1. Схема расположения антенных решеток Сибирского радиогелиографа

Таблица 1

Основные параметры СРГ

Частотный диапазон, ГГц	Пространственное разрешение, угл. сек	Временное разрешение при получении изображения на одной частоте	Спектральное разрешение, МГц	Динамический диапазон по мощности входного сигнала, дБ	Динамический диапазон изображений, дБ	Чувствительность по спектральной плотности потока (время накопления 0.1 с при получении изображения на одной частоте), Вт/(м ² ·Гц)
3–6 6–12 12–24	15–30 12–24 7–13	время накопления до 0.1 с	10	30	23 23 20	$40 \cdot 10^{-26}$ $70 \cdot 10^{-26}$ $250 \cdot 10^{-26}$

чивают визуализацию данных и их хранение в формате FITS. Управление списком принимаемых частот позволяет выбирать режимы наблюдения, т. е. наблюдать быстрые процессы на ограниченном наборе частот с секундным разрешением либо измерять спектры квазистационарных структур, таких как активные области, с высоким спектральным разрешением за десяток минут.

Ввод антенных решеток в режим регулярных наблюдений будет осуществляться поэтапно. В 2020 г. планируется начало регулярных наблюдений в среднем диапазоне 3–6 ГГц, затем будет введена решетка 6–12 ГГц и последней будет запущена решетка 12–24 ГГц.

1.2. Спектрополяриметры интегрального излучения Солнца

Наблюдения на многоволновом СРГ будут дополняться данными об интегральном излучении Солнца в диапазоне от миллиметровых до метровых длин волн.

Спектрополяриметр сантиметрового диапазона измеряет интенсивность I и круговую поляризацию V . Диапазон принимаемых частот будет разбит на два, соответствующие разным диаметрами антенн (табл. 2).

Задачей данного спектрополяриметра является мониторинг радиоизлучения Солнца с высоким спектральным и временным разрешением в широком диапазоне частот, достаточном для регистрации

Таблица 2

Диаметры антенн, м	1 и 3
Диапазон частот, ГГц	3–24
Частотное разрешение, МГц	10
Динамический диапазон, дБ	60
Временное разрешение, с	0.1

узкополосных спайков. Данные спектрополяриметра будут также использоваться для амплитудной калибровки яркости на изображениях СРГ, особенно во время мощных всплесков микроволнового излучения.

Основной целью спектрополяриметра метрового–дециметрового диапазона является мониторинг излучения КВМ и шумовой обстановки в диапазонах частот навигационных спутниковых сетей GPS, ГЛОНАСС, Beidou и Galileo (1100–1610 МГц). В метровом диапазоне используется логопериодическая антенна с перпендикулярными вибраторами и совмещенными центрами. Измерения абсолютных значений потоков излучения, например на частоте 2.8 ГГц, можно будет использовать как индексы солнечной активности (табл. 3).

Таблица 3

Диапазон частот, МГц	50–3000
Динамический диапазон, дБ	40
Временное разрешение, с	0.1
Количество частотных каналов	500



Рис. 2. Часть антенной решетки СРГ-48. Диаметр антенн 1.8 м, расстояние между антеннами 4.9 м. Белые антенны большего диаметра на конце луча остались от антенной решетки ССРТ. Сигналы с антенн с помощью волоконных линий, расположенных в тоннеле, передаются в рабочее здание за антеннами

1.3. Технический задел и тестовые испытания систем радиогелиографа

Проектирование многоволнового радиогелиографа было бы невозможно без многолетних инженерных разработок, проводимых сотрудниками ИСЗФ СО РАН. Технические решения и устройства многоволнового радиогелиографа проверялись в натурных испытаниях на прототипах-интерферометрах в диапазоне частот 4–8 ГГц, антенны которых монтировались на поворотных устройствах ССРТ. Первый прототип, состоявший из десяти антенн, расположенных на крайних антенных постах ССРТ с максимальной базой 622.3 м, начал работать в 2010 г. [Lesovoi et al., 2012]. Были проверены решения для конструирования систем сбора данных на волоконных линиях, широкополосных облучателей, гетеродинов, аналоговых и цифровых приемников, коррелятора. С помощью прототипа проводились регулярные наблюдения Солнца и были получены новые научные результаты. В частности, было экспериментально показано существенное влияние вариаций размеров источников с частотой на форму интегральных микроволновых спектров вспышек [Altyntsev et al., 2012].

Следующим этапом подготовительных работ было создание в 2016 г. 48-антенного радиогелиографа, конструкция и первые результаты наблюдений которого описаны в работах [Лесовой и др., 2017; Лесовой, Кобец, 2018; Lesovoi et al., 2014; Grechnev et al., 2018; Федотова и др., 2018]. СРГ-48 был создан в рамках выполнения ФЦП «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008–2015 гг.» на базе антенно-поворотных устройств ССРТ. Антенны этого прототипа были установлены на центральных поворотных устройствах ССРТ (рис. 2) с максимальной используемой базой 107.4 м. Помимо продолжения обработки технических вопросов, создание СРГ-48 позволило

начать разработку программного обеспечения для реконструкции изображений и методов их калибровки. На СРГ-48 был начат регулярный мониторинг солнечной активности с представлением данных наблюдений в сети Интернет в режиме онлайн (рис. 3). Результаты тестирования и первые научные результаты, полученные с помощью прототипов, подтвердили правильность выбранных решений и дали уверенность в том, что характеристики создаваемого инструмента будут соответствовать планируемому.

Контроль работы радиогелиографа и мониторинг солнечной активности осуществляются с помощью корреляционных кривых, представляющих собой сумму кросс-корреляционных функций сигналов всех

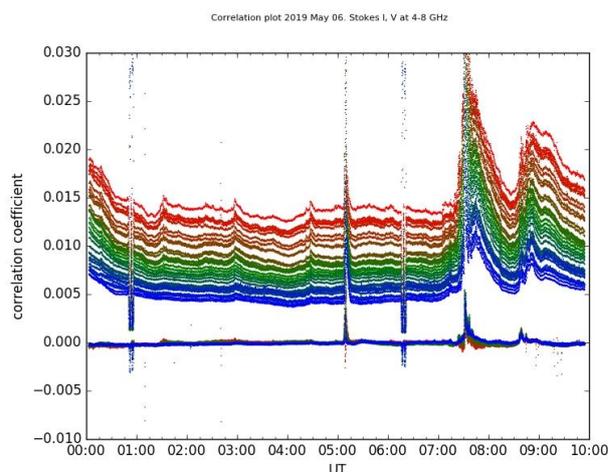


Рис. 3. Корреляционные кривые СРГ-48, записанные 06.05.2019 на 32 частотах в диапазоне 4–8 ГГц. Верхние кривые показывают изменения интенсивности (частоты растут сверху вниз), нижние кривые — изменения круговой поляризации. Видны отклики на вспышки рентгеновских классов M1.0 (05:10), C1.7 (07:23), C2.0 (08:41) и интервалы амплитудных калибровок в 00:45 и 06:20. Время везде соответствует шкале UTC

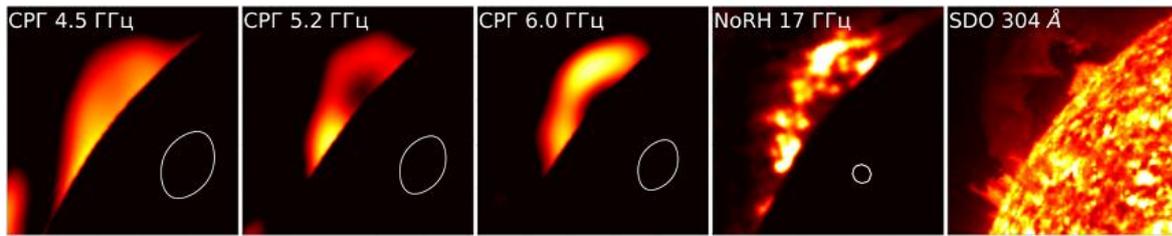


Рис. 4. Подъем волокна над лимбом Солнца 24 апреля 2017 г. (03:10 UT). На панелях 1–3 представлены изображения СРГ-48 в диапазоне частот 4.5–6.0 ГГц, Нобеяма на 17 ГГц и SDO/AIA на длине волны 304 Å. Размер кадра 400×400 угл. сек. Овалы показывают диаграммы направленности интерферометров на соответствующих частотах

антенных пар [Лесовой, Кобец, 2017]. В первом приближении степени кросс-корреляции пропорциональны интенсивности излучения Солнца на данной частоте. На рис. 3 показаны корреляционные кривые на 32 частотах, записанные 6 мая 2019 г. Приведенные на рис. 3 корреляционные кривые, полученные на 32 частотах 6 мая 2019 г., показывают, что наземным инструментом можно регистрировать излучение даже слабых солнечных вспышек рентгеновского класса C и ниже. Корреляционные кривые СРГ-48 и изображения Солнца на принимаемых частотах представляются в реальном времени на странице [<http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>]. В частности, последовательности изображений позволяют определить место эруптивного события на Солнце, что важно для оценки его геоэффективности.

На рис. 4 приведен пример наблюдений поднимающегося волокна. Несмотря на невысокое пространственное разрешение СРГ-48, полученные на нем изображения воспроизводят очертания эруптивного протуберанца, наблюдавшегося также японским радиогелиографом на более высокой частоте и ультрафиолетовым телескопом AIA на борту космической обсерватории SDO. Наблюдения выбросов плазмы с помощью СРГ-48 обсуждаются на примерах в работах [Федотова и др., 2018; Grechnev et al., 2018]. После завершения строительства СРГ его диаграмма направленности на 6 ГГц будет близка к диаграмме, показанной на рис. 4 для радиогелиографа Нобеяма. Высокое разрешение СРГ позволит разрешать пространственную структуру выбросов, а анализ спектров — оценивать распределение плотности и температуры плазмы по выбросу.

1.4. Измерения спектров интегрального потока Солнца

Спектрополяриметры интегрального потока позволяют оперативно обнаруживать солнечные вспышки и оценивать их интенсивность. Появление слабых радиовсплесков является одним из важных предикторов мощных вспышек. Важными характеристиками спектрополяриметрических наблюдений являются их всепогодность и относительная дешевизна по сравнению со спутниковыми наблюдениями. В настоящее время широко используются данные круглосуточных измерений интегрального потока радиоизлучения с временным разрешением 1 с на частотах 245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800, 15400 МГц. Данные предоставляются RSTN [Kennewell, 1998] на сайте [<https://www.ngdc.noaa.gov>]. В микроволнах также

доступны измерения потоков радиоизлучения в обсерватории Нобеяма в интенсивности и круговой поляризации на частотах 1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35 ГГц и только в интенсивности на 80 ГГц с временным разрешением до 0.1 с во время интенсивных всплесков [Torii et al., 1979; Nakajima et al., 1985]. Данные доступны на сайте [<https://solar.nro.nao.ac.jp/norp>]. В обоих случаях данные недоступны в реальном времени. В диапазоне метровых волн (преимущественно 45–870 МГц) развернута глобальная сеть e-CALLISTO с целью мониторинга КВМ [Benz et al., 2009].

В Радиоастрофизической обсерватории наблюдения на СРГ-48 сопровождаются спектрополяриметры с диапазонами принимаемых частот 2–24 ГГц (16 каналов, интервал 1.6 с) и 4–8 ГГц (26 каналов, 10 мс). Описание инструментов дано в работах [Муратов, 2011; Zhdanov, Zandanov, 2015]. Создаваемые спектрополяриметры, характеристики которых приведены в разделе 1.2, будут использовать современную элементную базу. Отметим, что для приложений представляет интерес не только индекс F10.7, но и, например F30, который лучше коррелирует с торможением спутников на высотах до 1000 км [Yaşa et al., 2017].

1.5. Методики анализа данных

Для эффективного использования данных СРГ необходима разработка алгоритмов анализа большого потока изображений Солнца на десятках частот в диапазоне 3–24 ГГц. Чтобы обеспечить широкое использование данных, на сайте будут представлены корреляционные кривые и изображения Солнца на выбранных частотах в реальном времени. Основные методики отработаны на данных СРГ-48. На рис. 5 показана Web-страница [<http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>] с корреляционными кривыми на 32 частотах в диапазоне 4–8 ГГц в интенсивности (R+L) и круговой поляризации (R–L). Справа показаны сырые изображения в момент наблюдений. Обновление страницы производится каждые несколько минут.

Для использования результатов наблюдений СРГ в удаленном доступе будут создаваться архивы данных, каталоги наблюдений и пакеты программ на языке Python для синтетизирования и восстановления изображений и расчета спектральных характеристик исследуемых структур в интервалах времени, выбранных пользователем.

Методология исследований с помощью многоволновых радиогелиографов должна опираться на современные средства трехмерного моделирования, использующие методы реконструкции коронального

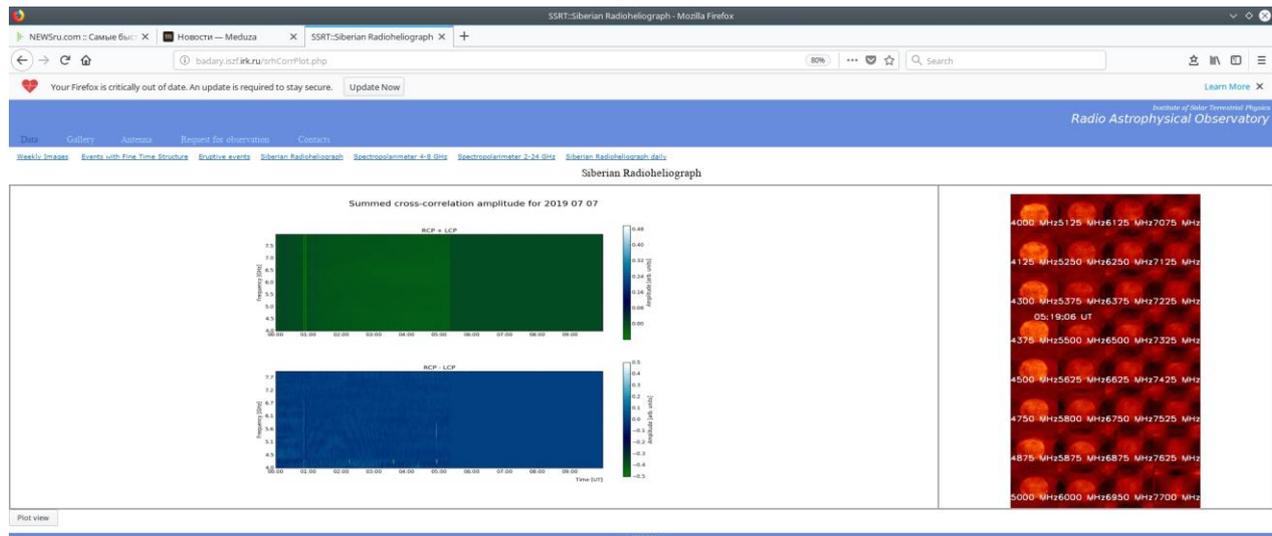


Рис. 5. Web-страница [<http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>] во время наблюдений 7 июля 2019 г. Корреляционные зависимости на 32 частотах в диапазоне 4–8 ГГц в интенсивности (R+L) и круговой поляризации (R–L). Справа — сырые изображения в данный момент наблюдений

магнитного поля, апробированные модели нагрева хромосферы и короны, оптимизированные методы быстрого вычисления спектров электромагнитного излучения в интенсивности и поляризации.

Для анализа данных наблюдений СРГ развиваются интерактивные методы моделирования радиоспектра по солнечным изображениям [Fleishman et al., 2019; Gary et al., 2019]. При моделировании учитываются доминирующие механизмы радиоизлучения — гирорезонансный, гиросинхротронный и тормоной. Параметры тепловой плазмы и ускоренных электронов задаются в модели так, чтобы модельные распределения излучений в радио-, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах были близки к имеющимся наблюдениям. Процедура подгонки параметров модели состоит в достижении наилучшего согласия между трехмерной моделью и наблюдаемыми двумерными радиокартами на разных частотах. Повторение этой процедуры позволит получать эволюционирующие распределения параметров магнитного поля и ускоренных электронов во вспышечных петлях. Это впервые позволит детально исследовать эволюцию магнитного поля во вспышках, накопление и релаксацию магнитной энергии, процессы инициации эруптивных событий.

Технологии построения трехмерных моделей динамических корональных структур в атмосфере Солнца, основанные на микроволновых данных, развиваются сотрудниками ИСЗФ СО РАН, ряда институтов России (САО РАН, ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербургского университета) и солнечной группы в Технологическом институте Нью-Джерси [Fleishman et al., 2019; Gary et al., 2019; Kuznetsov, Kontar, 2015]. Использование моделей позволит кардинально улучшить прогноз и диагностику геоэффек-

тивных эруптивных событий, таких как солнечные вспышки и КВМ [Fleishman, Kuznetsov, 2010; Wang et al., 2015; Fleishman et al., 2018].

Следующим важным направлением использования данных СРГ является исследование процессов энерговыделения в солнечной атмосфере — как постепенного, приводящего к нагреву хромосферы и короны, так и спорадического, проявляющегося в форме солнечных вспышек и КВМ. Наблюдения в радиодиапазоне в дополнение к измерениям в жестком рентгеновском диапазоне позволяют получить данные о потоках ускоренных частиц, причем, в отличие от рентгеновских наблюдений, в структурах с разреженной плазмой, плотность которой типична для короны. Следовательно, данные СРГ могут быть использованы при решении следующих задач: поиск триггеров солнечных вспышек и КВМ, изучение механизмов нагрева и ускорения частиц в солнечных вспышках, изучение кинематики выбросов на стадии их ускорения, определение скорости магнитного пересоединения и характерных масштабов элементарных актов энерговыделения, измерение параметров плазмы в корональных дырах — областях формирования высокоскоростной компоненты солнечного ветра.

Благодаря своей однородности, регулярности и большому динамическому диапазону данные радиогелиографов привлекательны для изучения законов распределения процессов энерговыделения по их мощности, пространственным и временным масштабам. В частности, с помощью измерений рассеяния микроволнового излучения в нижней короне Солнца был установлен фликкер-характер спектров мощности турбулентных возмущений плотности плазмы в области формирования потоков солнечного

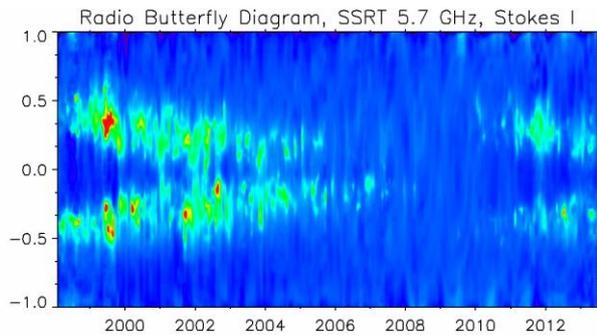


Рис. 6. Синоптическая карта интенсивности микроволнового излучения в 23-м цикле солнечной активности на частоте 5.7 ГГц, построенная по данным ССРТ

ветра [Chashei et al., 2006]. Значительный интерес представляют данные об эволюции крупномасштабных магнитных структур на временных масштабах, превышающих солнечный цикл [Shibasaki, 2013]. Изучение характера самоорганизации явлений солнечной активности имеет принципиальное значение для определения заблаговременности их надежного прогноза. На рис. 6 показано синоптическое яркостное распределение в радиоизлучении на частоте 5.7 ГГц, собранное из ежедневных радиокарт полного диска в интенсивности, полученных на ССРТ. Видны так называемые бабочки Маундера, отражающие постепенный дрейф активных областей к экватору в 23-м цикле солнечной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Картографирование Солнца в микроволновом диапазоне на разных частотах является мощным и относительно недорогим по сравнению с космическими технологиями средством мониторинга параметров солнечной активности и диагностики параметров плазмы. Радионаблюдения особенно важны в ближайшее десятилетие, когда возможности внеатмосферных спектральных наблюдений в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах будут ограничены.

Главными фундаментальными задачами, решаемыми с помощью многоволновых радиогелиографов, являются изучение процессов формирования нестабильных корональных магнитных конфигураций и процессы их импульсной релаксации, идентификация механизмов ускорения (квазистатические электрические поля, стохастическое ускорение и ударные волны), определение вклада эффектов переноса энергии и частиц (захват частиц в магнитных структурах, рассеяние и ускорение частиц при взаимодействии с турбулентностью, нагрев корональных и хромосферных областей солнечной атмосферы).

В оперативных и точных сводках гелиогеофизической обстановки и космической погоды заинтересовано большое число государственных и коммерческих организаций России. Ситуация осложняется отсутствием отечественной системы непрерывного мониторинга солнечной активности с помощью как космических, так и наземных средств. В области слежения за процессами на Солнце и в околоземном пространстве Россия зависит от зарубежных систем мониторинга, в основном США и стран Евросоюза.

В этой связи всепогодный мониторинг электромагнитного солнечного излучения (в диапазоне от метровых до миллиметровых волн, включая измерения индекса солнечной активности на частоте 2.8 ГГц) в месте расположения разнообразных диагностических средств Гелиогеофизического комплекса приобретает особую ценность. Будут развиваться методы краткосрочного прогноза солнечных вспышек, измерений кинематических характеристик и параметров плазмы КВМ, прогноза характеристик быстрых потоков солнечного ветра.

Создание комплекса новых крупных экспериментальных установок с принципиально новыми возможностями позволит на мировом уровне выполнять исследования в данной области и обеспечить стратегический задел на 20–30 лет. Реализация прорывных проектов с опорой на уникальные данные наблюдений будет привлекать ведущих и молодых специалистов России и зарубежья.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы П.16.3.2. «Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере», проекта «Первичное энерговыделение и турбулентность в солнечных вспышках» в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН КП 19-270 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей», а также при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00172). Экспериментальные данные получены с использованием уникальной научной установки ССРТ [<http://ckp-rf.ru/usu/73606>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов-Максимов В.Е., Боровик В.Н., Опейкина Л.В., Тлатов А.Г. Особенности развития активных областей на Солнце перед большими вспышками класса X: анализ данных радиотелескопа РАТАН-600 и космической обсерватории SDO // Косм. иссл. 2014. Т. 52, № 1. С. 3. DOI: [10.7868/S0023420614010014](https://doi.org/10.7868/S0023420614010014).
- Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Цап Ю.Т. О смене знака поляризации микроволнового излучения в пятенных радиосточниках на Солнце // Астрон. журнал. 2005. Т. 82. С. 838.
- Лесовой С.В., Кобец В.С. Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 17–21. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).
- Лесовой С.В., Кобец В.С. Модель отклика Сибирского радиогелиографа на спокойное Солнце // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 4. С. 106–113. DOI: [10.12737/szf-44201811](https://doi.org/10.12737/szf-44201811).
- Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16. DOI: [10.12737/24347](https://doi.org/10.12737/24347).
- Максимов В.П., Бакунина И.А., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек. Патент № 2114449 от 27.06.1998 г. // Бюлл. изобретений. 1996. Т. 21. С. 131–134.
- Муратов А.А. Солнечный спектрополяриметр диапазона 2–8 ГГц // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: Иркутск, 19–24 сентября 2011. С. 21–22.
- Федотова А.Ю., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Наблюдения эруптивных событий с помощью Сибирского радиогелиографа // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 3. С. 17–27. DOI: [10.12737/szf-43201802](https://doi.org/10.12737/szf-43201802).
- Флейшман Г.Д., Мельников В.Ф. Солнечные миллисекундные радиоспайки // УФН. 1998. Т. 168, № 12. С. 1265–1301. DOI: [10.3367/UFNr.0168.199812a.1265](https://doi.org/10.3367/UFNr.0168.199812a.1265).

- Afraimovich E.L., Altyntsev A.T., Kosogorov E.A., et al. Ionospheric effects of the solar flares of September 23, 1998 and July 29, 1999 as deduced from global GPS network data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 63, iss. 17. P. 1841–1849. DOI: [10.1016/S1364-6826\(01\)00060-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00060-8).
- Akhmedov Sh.B., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N. The measurement of magnetic fields in the solar atmosphere above sunspots using gyroresonance emission // *Solar Phys.* 1982. V. 79, iss. 1. P. 41–58. DOI: [10.1007/BF00146972](https://doi.org/10.1007/BF00146972).
- Altyntsev A.T., Grechnev V.V., Konovalov S.K., et al. On the apparent size of solar microwave spike sources // *Astrophys. J.* 1996. V. 469. P. 976. DOI: [10.1086/177844](https://doi.org/10.1086/177844).
- Altyntsev A.A., Fleishman G.D., Lesovoi S.V., Meshalkina N.S. Thermal to nonthermal energy partition at the early rise phase of solar flares // *Astrophys. J.* 2012. V. 758, iss. 2. Article id. 138. 12 p. DOI: [10.1088/0004-637X/758/2/138](https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/138).
- Bala B., Lanzerotti L.J., Gary D.E., Thomson D.J. Noise in wireless systems produced by solar radio bursts // *Radio Sci.* 2002. V. 37. P. 1018. DOI: [10.1029/2001RS002481](https://doi.org/10.1029/2001RS002481).
- Bastian T.S. Angular scattering of solar radio emission by coronal turbulence // *Astrophys. J.* 1994. V. 426, N 2. P. 774–781. DOI: [10.1086/174114](https://doi.org/10.1086/174114).
- Benz A.O., Monstein C., Meyer H., et al. A world-wide net of solar radio spectrometers: e-Callisto // *Earth, Moon, and Planets.* 2009. V. 104, iss. 1-4. P. 277–285. DOI: [10.1007/s11038-008-9267-6](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9267-6).
- Cerruti A.P., Kintner P.M., Gary D.E., et al. Observed solar radio burst effects on GPS/wide area augmentation system carrier-to-noise ratio // *Space Weather.* 2006. V. 4, iss. 10. CiteID S10006. DOI: [10.1029/2006SW000254](https://doi.org/10.1029/2006SW000254).
- Chashei I.V., Shishov V.I., Altyntsev A.T. Apparent angular sizes of the sources of microwave subsecond pulses and electron-density fluctuations in the lower solar corona // *Astron. Rep.* 2006. V. 50, iss. 3. P. 249–254. DOI: [10.1134/S1063772906030085](https://doi.org/10.1134/S1063772906030085).
- Chernov G.P. Solar radio bursts with drifting stripes in emission and absorption // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 127, iss.1-4. P. 195–326. DOI: [10.1007/s11214-006-9141-7](https://doi.org/10.1007/s11214-006-9141-7).
- Chertok I.M., Abunina M.A., Abunin A.A., et al. Relationship between the magnetic flux of solar eruptions and the A_p index of geomagnetic storms // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 2. P. 627–633. DOI: [10.1007/s11207-014-0618-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0618-3).
- de Pontieu B., Title A.M., Lemen J.R., et al. The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) // *Solar Phys.* 2014. V. 289, iss.7. P. 2733–2779. DOI: [10.1007/s11207-014-0485-y](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0485-y).
- Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO mission: An overview // *Solar Phys.* 1995. V. 162, iss. 1-2. P. 1–37. DOI: [10.1007/BF00733425](https://doi.org/10.1007/BF00733425).
- Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes // *Astrophys. J.* 2010. V. 721, iss. 2. P. 1127–1141. DOI: [10.1088/0004-637X/721/2/1127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1127).
- Fleishman G.D., Nita G.M., Kuroda N., et al. Revealing the evolution of non-thermal electrons in solar flares using 3D modeling // *Astrophys. J.* 2018. V. 859, iss. 1. Article id. 17. 14 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aabae9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabae9).
- Fleishman G., Bastian T.S., Chen Bin, et al. Solar coronal magnetic fields: quantitative measurements at radio wavelengths. *Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, science white papers, no. 426* // *Bull. American Astron. Soc.* 2019. V. 51, iss. 3. Id. 426.
- Fox N.J., Velli M.C., Bale S.D., et al. The Solar Probe Plus Mission: humanity's first visit to our star // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 204, iss. 1-4. P. 7–48. DOI: [10.1007/s11214-015-0211-6](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0211-6).
- Gary D.E., Bastian T.S., White S.M., Hurford G.J. The Frequency-Agile Solar Radiotelescope (FASR) // *Proc. Asia-Pacific Radio Science Conference AP-RASC '01.* Chuo University, Tokyo, Japan, 1–4 August, 2001. P. 236.
- Gary D.E., Bastian T.S., Chen B., et al. Radio observations of solar flares // *Science with a Next Generation Very Large Array, ASP Conf. Ser.* 2018a. V. 517. P. 99.
- Gary D.E., Bin Chen, Dennis B.R., et al. Microwave and hard X-ray observations of the 2017 September 10 solar limb flare // *Astrophys. J.* 2018b. V. 863, iss. 1. Article id. 83. 9 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aad0ef](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad0ef).
- Gary D., Bastian T.S., Chen Bin, et al. Particle acceleration and transport. New perspectives from radio, X-ray, and gamma-ray observations // *Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, science white papers, no. 371*; *Bull. of the American Astron. Soc.* 2019. V. 51, iss. 3. Id. 371.
- Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., et al. The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data // *Solar Phys.* 2003. V. 216, iss. 1-2. P. 239–272. DOI: [10.1023/A:1026153410061](https://doi.org/10.1023/A:1026153410061).
- Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., et al. An extreme solar event of 20 January 2005: Properties of the flare and the origin of energetic particles // *Solar Phys.* 2008. V. 252, iss. 1. P. 149–177. DOI: [10.1007/s11207-008-9245-1](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9245-1).
- Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. IV. Unusual magnetic cloud and overall scenario // *Solar Phys.* 2014. V. 289, iss. 12. P. 4653–4673. DOI: [10.1007/s11207-014-0596-5](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0596-5).
- Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Kochanov A.A., et al. Multi-instrument view on solar eruptive events observed with the Siberian Radioheliograph: From detection of small jets up to development of a shock wave and CME // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 174. P. 46–65. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.04.014).
- Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., et al. The STEREO mission: An introduction // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 136, iss.1-4. P. 5–16. DOI: [10.1007/s11214-007-9277-0](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0).
- Kaltman T.I., Bogod V.M., Stupishin A.G., Yasnov L.V. Physical conditions in the low corona and chromosphere of solar active regions according to spectral radar measurements // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. V. 53, iss. 8. P. 1030–1034. DOI: [10.1134/S0016793213080082](https://doi.org/10.1134/S0016793213080082).
- Kaltman T.I., Kochanov A.A., Myshyakov I.I., et al. Observations and modeling of the spatial distribution and microwave radiation spectrum of the active region NOAA 11734 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015. V. 55, iss. 8. P. 1124–1130. DOI: [10.1134/S0016793215080125](https://doi.org/10.1134/S0016793215080125).
- Kennewell J.A. 18th NSO/Sacramento Peak Summer Workshop “Synoptic Solar Physics”. Sunspot, New Mexico, 8–12 September 1997 // *ASP Conf. Ser.* 1998. V. 140. P. 529.
- Knipp D.J., Ramsay A.C., Beard E.D., et al. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses // *Space Weather.* 2016. V. 14, iss.9. P. 614–633. DOI: [10.1002/2016SW001423](https://doi.org/10.1002/2016SW001423).
- Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T., et al. The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview // *Solar Phys.* 2007. V. 243, iss.1. P. 3–17. DOI: [10.1007/s11207-007-9014-6](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9014-6).
- Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream // *Solar Phys.* 1973, V. 29, iss. 2. P. 505–525. DOI: [10.1007/BF00150828](https://doi.org/10.1007/BF00150828).
- Kuznetsov A.A., Kontar E.P. Spatially resolved energetic electron properties for the 21 May 2004 flare from radio observations and 3D simulations // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 1. P. 79–93. DOI: [10.1007/s11207-014-0530-x](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0530-x).
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. The Multifrequency Siberian Radioheliograph // *Solar Phys.* 2012. V. 280, iss. 2. P. 651–661. DOI: [10.1007/s11207-012-0008-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0008-7).
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph // *Res. Astron. Astrophys.* 2014. V. 14, iss. 7. P. 864–868. DOI: [10.1088/1674-4527/14/7/008](https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/7/008).
- Maksimov V.P., Prosovetsky D.V. Structure of the program of short-term prediction of power solar flares // *Chin. J. Space Sci. (Spec. Iss.)*. 2005. V. 25, iss. 5. P. 329–332.
- Marqué C., Klein K.-L., Monstein C., et al. Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation // *J. Space Weather and Space Climate.* 2018. V. 8. Id. A42. 13 p.

Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M., et al. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 1985. V. 37, N 1. P. 163.

Nakajima H., Nishio M., Enome S., Shibasaki K., et al. The Nobeyama radioheliograph // *Proc. IEEE*. 1994. V. 82, iss. 5. P. 705–713.

Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275, iss. 1-2. P. 3–15. DOI: [10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).

Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Analysis of reconstruction methods for nonlinear force-free fields // *Solar Phys.* 2009. V. 257, iss.2. P. 287–304. DOI: [10.1007/s11207-009-9389-7](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9389-7).

Schonfeld S.J., White S.M., Henney C.J., et al. Coronal sources of the solar $F10.7$ radio flux // *Astrophys. J.* 2015. V. 808, iss. 1. Article id. 29. 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/29](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/29).

Shibasaki K. Long-term global solar activity observed by the Nobeyama Radioheliograph // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2013. V. 65, iss. SP1, S17. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S17](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S17).

Smolkov G.Ya., Pistolkors A.A., Treskov T.A., et al. The Siberian Solar Radio-Telescope: Parameters and principle of operation, objectives and results of first observations of spatio-temporal properties of development of active regions and flares // *Astrophys. Space Sci.* 1986. V. 119, iss. 1. P. 1–4. DOI: [10.1007/BF00648801](https://doi.org/10.1007/BF00648801).

Smolkov G.Ya., Uralov A.M., Bakunina I.A. Radioheliographic diagnostics of the potential flare productivity of active regions // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. V. 49. P. 1101–1105. DOI: [10.1134/S0016793209080106](https://doi.org/10.1134/S0016793209080106).

Smolkov G.Ya., Maksimov V.P., Prosovetskii D.V., et al. An experience of radioheliographic prediction of powerful solar flares // *Bull. Crimean Astrophys. Observatory*. 2010. V. 106. P. 31–33. DOI: [10.3103/S0190271710010055](https://doi.org/10.3103/S0190271710010055).

Stenflo J.O. Stokes polarimetry of the Zeeman and Hanle effects // *ISSI Scientific Rep. Ser.* 2010. V. 9. P. 543–557.

Tanaka H., Enome S. The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares // *Solar Phys.* 1975. V. 40. P. 123–131. DOI: [10.1007/BF00183156](https://doi.org/10.1007/BF00183156).

Tokhchukova S., Bogod V.M. Detection of long-term microwave “darkening” before the 14 July 2000 flare // *Solar Phys.* 2003. V. 212. P. 99–109. DOI: [10.1023/A:1022967619993](https://doi.org/10.1023/A:1022967619993).

Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S., et al. Full-automatic radiopolarimeters for solar patrol at microwave frequencies // *Proc. The Research Institute of Atmospheric Sciences, Nagoya University*. 1979. V. 26. P. 129.

Treumann R.A. The electron-cyclotron maser for astrophysical application // *Astron. Astrophys. Rev.* 2006. V. 13. P. 229–315. DOI: [10.1007/s00159-006-0001-y](https://doi.org/10.1007/s00159-006-0001-y).

Tritschler A., Rimmele T.R., Berukoff S., et al. Daniel K. Inouye Solar Telescope: High-resolution observing of the dynamic Sun // *Astronomische Nachrichten*. 2016. V. 337. P. 1064. DOI: [10.1002/asna.201612434](https://doi.org/10.1002/asna.201612434).

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, N A07S01. DOI: [10.1029/2005JA011273](https://doi.org/10.1029/2005JA011273).

Tsurutani B.T., Verkhoglyadova O.P., Mannucci A.J., et al. A brief review of solar flare effects on the ionosphere // *Radio Sci.* 2009. V. 44. RS0A17. DOI: [10.1029/2008RS004029](https://doi.org/10.1029/2008RS004029).

Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. 17 GHz neutral line associated sources: Birth, motion, and projection effect // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2006. V. 58. P. 21–28. DOI: [10.1093/pasj/58.1.21](https://doi.org/10.1093/pasj/58.1.21).

Uralov A.M., Grechnev V.V., Rudenko G.V., et al. Microwave neutral line associated source and a current sheet // *Solar Phys.* 2008. V. 249. P. 315–335. DOI: [10.1007/s11207-008-9183-y](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9183-y).

Wang Z., Gary D.E., Fleishman G.D., White S.M. Coronal magnetography of a simulated solar active region from mi-

crowave imaging spectropolarimetry // *Astrophys. J.* 2015. V. 805, iss. 2. Article id. 93. 13 p. DOI: [10.1088/0004-637X/805/2/93](https://doi.org/10.1088/0004-637X/805/2/93).

Yan Y., Zhang J., Wang W., et al. The Chinese Spectral Radioheliograph — CSRH // *Earth, Moon, and Planets*. 2009. V. 104, iss. 1-4. P. 97–100. DOI: [10.1007/s11038-008-9254-y](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9254-y).

Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., et al. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS and HF radio wave propagation // *Space Weather*. 2018. V. 16. P. 1013–1027. DOI: [10.1029/2018SW001932](https://doi.org/10.1029/2018SW001932).

Yaya P., Hecker L., Dudok de Wit T., et al. Developing new space weather tools: Transitioning fundamental science to operational prediction systems // *J. Space Weather Space Climate*. 2017. V. 7, A35. DOI: [10.1051/swsc/2017032](https://doi.org/10.1051/swsc/2017032).

Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F., et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, iss. A10. CiteID A10102. DOI: [10.1029/2007JA012321](https://doi.org/10.1029/2007JA012321).

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 1. P. 287–294. DOI: [10.1007/s11207-014-0553-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0553-3).

URL: <http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php> (дата обращения 20 октября 2019 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov> (дата обращения 20 октября 2019 г.).

URL: <https://solar.nro.nao.ac.jp/norp> (дата обращения 20 октября 2019 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606> (дата обращения 20 октября 2019 г.).

REFERENCES

Abramov-Maksimov V.E., Borovik V.N., Opeikina L.V., Tlatov A.G. Peculiarities in evolution of solar active regions before powerful X class flares: analysis of RATAN-600 and SDO space observatory data. *Kosmicheskoe issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2014, vol. 52, iss. 1, p. 3. DOI: [10.7868/S0023420614010014](https://doi.org/10.7868/S0023420614010014). (In Russian).

Afraimovich E.L., Altyn'tsev A.T., Kosogorov E.A., Larina N.S., Leonovich, L.A. Ionospheric effects of the solar flares of September 23, 1998 and July 29, 1999 as deduced from global GPS network data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. vol. 63, iss. 17, pp. 1841–1849. DOI: [10.1016/S1364-6826\(01\)00060-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00060-8).

Akhmedov Sh.B., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N. The measurement of magnetic fields in the solar atmosphere above sunspots using gyroresonance emission. *Solar Phys.* 1982, vol. 79, iss. 1, pp. 41–58. DOI: [10.1007/BF00146972](https://doi.org/10.1007/BF00146972).

Altyn'tsev A.T., Grechnev V.V., Kononov S.K., Lesovoi S.V., Lisysian, E.G., Treskov T.A., et al. On the apparent size of solar microwave spike sources. *Astrophys. J.* 1996, vol. 469, p. 976. DOI: [10.1086/177844](https://doi.org/10.1086/177844).

Altyn'tsev A.A., Fleishman G.D., Lesovoi S.V., Meshalkina N.S. Thermal to nonthermal energy partition at the early rise phase of solar flares. *Astrophys. J.* 2012, vol. 758, iss. 2, article id. 138, 12 p. DOI: [10.1088/0004-637X/758/2/138](https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/138).

Bala B., Lanzerotti L.J., Gary D.E., Thomson D.J. Noise in wireless systems produced by solar radio bursts. *Radio Sci.* 2002, vol. 37, p. 1018. DOI: [10.1029/2001RS002481](https://doi.org/10.1029/2001RS002481).

Bastian T.S. Angular scattering of solar radio emission by coronal turbulence. *Astrophys. J.* 1994, vol. 426, no. 2, pp. 774–781. DOI: [10.1086/174114](https://doi.org/10.1086/174114).

Benz A.O., Monstein C., Meyer H., Manoharan, P.K., Ramesh R., Altyn'tsev A., et al. A world-wide net of solar radio spectrometers: e-Callisto. *Earth, Moon, and Planets*. 2009, vol. 104, iss. 1-4, pp. 277–285. DOI: [10.1007/s11038-008-9267-6](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9267-6).

Cerruti A.P., Kintner P.M., Gary D.E., Lanzerotti L.J., de Paula E.R., Vo H.B., et al. Observed solar radio burst ef-

fects on GPS/wide area augmentation system carrier-to-noise ratio. *Space Weather*. 2006, vol. 4, iss. 10, CiteID S10006. DOI: [10.1029/2006SW000254](https://doi.org/10.1029/2006SW000254).

Chashei I.V., Shishov V.I., Altyntsev A.T. Apparent angular sizes of the sources of microwave subsecond pulses and electron-density fluctuations in the lower solar corona. *Astron. Rep.* 2006, vol. 50, iss. 3, pp. 249–254. DOI: [10.1134/S1063772906030085](https://doi.org/10.1134/S1063772906030085).

Chernov G.P. Solar radio bursts with drifting stripes in emission and absorption. *Space Sci. Rev.* 2006, vol. 127, iss.1-4, pp. 195–326. DOI: [10.1007/s11214-006-9141-7](https://doi.org/10.1007/s11214-006-9141-7).

Chertok I.M., Abunina M.A., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V. Relationship between the magnetic flux of solar eruptions and the A_p index of geomagnetic storms. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 2, pp. 627–633. DOI: [10.1007/s11207-014-0618-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0618-3).

Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO mission: An overview. *Solar Phys.* 1995, vol. 162, iss. 1-2, pp. 1–37. DOI: [10.1007/BF00733425](https://doi.org/10.1007/BF00733425).

de Pontieu B., Title A.M., Lemen J.R., Kushner G.D., Akin D.J., Allard B., et al. The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). *Solar Phys.* 2014, vol. 289, iss.7, pp. 2733–2779. DOI: [10.1007/s11207-014-0485-y](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0485-y).

Fedotova A.Yu., Altyntsev A.T., Kochanov A.A., Lesovoi S.V., Meshalkina N.S. Observation of eruptive events with the Siberian Radioheliograph. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 3, pp. 13–19. DOI: [10.12737/stp-43201802](https://doi.org/10.12737/stp-43201802).

Fleishman G.D., Melnikov V.F. Solar millisecond radio spikes. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics–Uspekhi (Advances in Physical Sciences)]. 1998, vol. 168, iss. 12, pp. 1265–1301. DOI: [10.3367/UFNr.0168.199812a.1265](https://doi.org/10.3367/UFNr.0168.199812a.1265). (In Russian).

Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes. *Astrophys. J.* 2010, vol. 721, iss. 2, pp. 1127–1141. DOI: [10.1088/0004-637X/721/2/1127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1127).

Fleishman G.D., Nita G.M., Kuroda N., Jia S., Tong K., Wen R.R., Zhizhuo Z. Revealing the evolution of non-thermal electrons in solar flares using 3D modeling. *Astrophys. J.* 2018, vol. 859, iss. 1, article id. 17, 14 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aabae9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabae9).

Fleishman G., Bastian T.S., Chen Bin, Gary D.E., Glesener L., Nita G., et al. Solar coronal magnetic fields: quantitative measurements at radio wavelengths. Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, science white papers, no. 426. *Bull. American Astron. Soc.* 2019, vol. 51, iss. 3, id. 426.

Fox N.J., Velli M.C., Bale S.D., Decker R., Driesman A., Howard R.A., et al. The Solar Probe Plus Mission: Humanity's first visit to our star. *Space Sci. Rev.* 2016, vol. 204, iss. 1-4, pp. 7–48. DOI: [10.1007/s11214-015-0211-6](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0211-6).

Gary D.E., Bastian T.S., White S.M., Hurford G.J. The Frequency-Agile Solar Radiotelescope (FASR). *Proc. Asia-Pacific Radio Science Conference AP-RASC '01*. Chuo University, Tokyo, Japan, 1–4 August, 2001, p. 236.

Gary D.E., Bastian T.S., Chen B., Fleishman G.D., Glesener L. Radio observations of solar flares. *Science with a Next Generation Very Large Array*. *ASP Conf. Ser.* 2018a, vol. 517, p. 99.

Gary D.E., Bin Chen, Dennis B.R., Fleishman G.D., Hurford G.J., Krucker S., et al. Microwave and hard X-ray observations of the 2017 September 10 solar limb flare. *Astrophys. J.* 2018b, vol. 863, iss. 1, article id. 83, 9 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aad0ef](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad0ef).

Gary D., Bastian T.S., Chen Bin, Drake J.F., Fleishman G., Glesener L., et al. Particle acceleration and transport. New perspectives from radio, X-ray, and gamma-ray observations Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, science white papers, no. 371. *Bull. American Astron. Soc.* 2019, vol. 51, iss. 3, id. 371.

Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., Krissinel B.B., Zandanov V.G., Altyntsev A.T., et al. The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data. *Solar Phys.* 2003, vol. 216, iss. 1-2, pp. 239–272. DOI: [10.1023/A:1026153410061](https://doi.org/10.1023/A:1026153410061).

Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., Uralov A.M., Nakajima H., Altyntsev A.T., et al. An extreme solar event of 20 January 2005: Properties of the flare and the origin of energetic particles. *Solar Phys.* 2008, vol. 252, iss. 1, pp. 149–177. DOI: [10.1007/s11207-008-9245-1](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9245-1).

Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., Belov A.V., Filippov B.P., Slemzin V.A., Jackson B.V. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. IV. Unusual magnetic cloud and overall scenario. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, iss. 12, pp. 4653–4673. DOI: [10.1007/s11207-014-0596-5](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0596-5).

Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Kochanov A.A., Uralov A.M., Altyntsev A.T., Gubin A.V., et al. Multi-instrument view on solar eruptive events observed with the Siberian Radioheliograph: From detection of small jets up to development of a shock wave and CME. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 174, pp. 46–65. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.04.014).

Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., St. Cyr O.C., Guhathakurta M., Christian E. The STEREO mission: An introduction. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 136, iss.1-4. P. 5–16. DOI: [10.1007/s11214-007-9277-0](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0).

Kaltman T.I., Korzhavin A.N., Tsap Yu.T. On a change of sign of microwave emission polarization in solar spot radio sources. *Astronomicheskii zhurnal* [Astron. J.]. 2005, vol. 82, p. 838. (In Russian).

Kaltman T.I., Bogod V.M., Stupishin A.G., Yasnov L.V. Physical conditions in the low corona and chromosphere of solar active regions according to spectral radar measurements. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, iss. 8, pp. 1030–1034. DOI: [10.1134/S0016793213080082](https://doi.org/10.1134/S0016793213080082).

Kaltman T.I., Kochanov A.A., Myshyakov I.I., et al. Observations and modeling of the spatial distribution and microwave radiation spectrum of the active region NOAA 11734. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015, vol. 55, iss. 8, pp. 1124–1130. DOI: [10.1134/S0016793215080125](https://doi.org/10.1134/S0016793215080125).

Kennewell J.A. 18th NSO/Sacramento Peak Summer Workshop “Synoptic Solar Physics”. Sunspot, New Mexico, 8–12 September 1997. *ASP Conf. Ser.* 1998, vol. 140, pp. 529.

Knipp D.J., Ramsay A.C., Beard E.D., et al. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses. *Space Weather.* 2016, vol. 14, iss.9, pp. 614–633. DOI: [10.1002/2016SW001423](https://doi.org/10.1002/2016SW001423).

Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T., Shimizu, T., Sone Y., Tachikawa S., et al. The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview. *Solar Phys.* 2007, vol. 243, iss.1, pp. 3–17. DOI: [10.1007/s11207-007-9014-6](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9014-6).

Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Solar Phys.* 1973, vol. 29, iss. 2, pp. 505–525. DOI: [10.1007/BF00150828](https://doi.org/10.1007/BF00150828).

Kuznetsov A.A., Kontar E.P. Spatially resolved energetic electron properties for the 21 May 2004 flare from radio observations and 3D simulations. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 1, pp. 79–93. DOI: [10.1007/s11207-014-0530-x](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0530-x).

Lesovoi S.V., Kobets V.S. Correlation dependences of the Siberian Radioheliograph. *Solar-Terr. Phys.* 2017. vol. 3, iss. 1, pp. 19–25. DOI: [10.12737/article_58f96eeb8fa318.06122835](https://doi.org/10.12737/article_58f96eeb8fa318.06122835).

Lesovoi S.V., Kobets V.S. Simulating Siberian Radioheliograph response to the quiet Sun. *Solar-Terr. Phys.* 2018. vol. 4, iss. 4, pp. 82–87. DOI: [10.12737/stp-44201811](https://doi.org/10.12737/stp-44201811).

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. The Multifrequency Siberian Radioheliograph. *Solar Phys.* 2012, vol. 280, iss. 2, pp. 651–661. DOI: [10.1007/s11207-012-0008-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0008-7).

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph. *Res. Astron. Astrophys.* 2014, vol. 14, iss. 7, pp. 864–868. DOI: [10.1088/1674-4527/14/7/008](https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/7/008).

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Kochanov A.A., Grechnev V.V., Gubin A.V., Zhdanov D.A., et al. Siberian Radio Heliograph: first results. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 1, pp. 3–18. DOI: [10.12737/article_58f96ec60fec52.86165286](https://doi.org/10.12737/article_58f96ec60fec52.86165286).

- Maksimov V.P., Bakunina I.A., Nefedev V.P., Smolkov G.Ya. Method of short-term forecast of powerful solar flares. *Patent N 2114449 of 27.06.1998. Byulleten' izobretenii* [Bull. Inventions]. 1996, vol. 21, pp. 131–134. (In Russian).
- Maksimov V.P., Prosovetsky D.V. Structure of the program of short-term prediction of power solar flares. *Chin. J. Space Sci. (Spec. Iss.)*. 2005, vol. 25, iss. 5, pp. 329–332.
- Marqué C., Klein K.-L., Monstein C., Opgenoorth H, Pulkkinen A, Buchert S., et al. Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation. *J. Space Weather and Space Climate*. 2018, vol. 8, id. A42, 13 p.
- Muratov A.A. Solar spectropolarimeter for 2–8 GHz range. *Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics. XII Young Scientists' Conference "Interaction of Fields and Radiation with Matter"*. Irkutsk, September 19–24, 2011, pp. 21–22. (In Russian).
- Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M., Kai K., Kawashima S. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama. *Publ. Astron. Soc. Japan*. 1985, vol. 37, no. 1, p. 163.
- Nakajima H., Nishio M., Enome S., Shibasaki K., Takano T., Hanaoka Y, et al. The Nobeyama radioheliograph. *Proc. IEEE*. 1994, vol. 82, iss. 5, pp. 705–713.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, iss. 1–2, pp. 3–15. DOI: [10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).
- Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Analysis of reconstruction methods for nonlinear force-free fields. *Solar Phys.* 2009, vol. 257, iss.2, pp. 287–304. DOI: [10.1007/s11207-009-9389-7](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9389-7).
- Schonfeld S.J., White S.M., Henney C.J., Arge C.N., McAteer R.T.J. Coronal sources of the solar F10.7 radio flux. *Astrophys. J.* 2015, vol. 808, iss. 1, article id. 29, 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/29](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/29).
- Shibasaki K. Long-term global solar activity observed by the Nobeyama Radioheliograph. *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2013, vol. 65, iss. SP1, S17. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S17](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S17).
- Smolkov G.Ya., Uralov A.M., Bakunina I.A. Radioheliographic diagnostics of the potential flare productivity of active regions. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009, vol. 49, pp. 1101–1105. DOI: [10.1134/S0016793209080106](https://doi.org/10.1134/S0016793209080106).
- Smolkov G.Ya., Maksimov V.P., Prosovetskii D.V., Uralov A.M., Bakunina I.A. An experience of radioheliographic prediction of powerful solar flares. *Bull. Crimean Astrophys. Observatory*. 2010, vol. 106, pp. 31–33. DOI: [10.3103/S0190271710010055](https://doi.org/10.3103/S0190271710010055).
- Smolkov G.Ya., Piskorskiy A.A., Treskov T.A., Krissinel B.B., Putilov V.A., Potapov N.N. The Siberian Solar Radio-Telescope: Parameters and principle of operation, objectives and results of first observations of spatio-temporal properties of development of active regions and flares. *Astrophys. Space Sci.* 1986, vol. 119, iss. 1, pp. 1–4. DOI: [10.1007/BF00648801](https://doi.org/10.1007/BF00648801).
- Stenflo J.O. Stokes polarimetry of the Zeeman and Hanle effects. *ISSI Scientific Rep. Ser.* 2010, vol. 9, pp. 543–557.
- Tanaka H., Enome S. The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares. *Solar Phys.* 1975, vol. 40, pp. 123–131. DOI: [10.1007/BF00183156](https://doi.org/10.1007/BF00183156).
- Tokhchukova S., Bogod V.M. Detection of long-term microwave “darkening” before the 14 July 2000 flare. *Solar Phys.* 2003, vol. 212, pp. 99–109. DOI: [10.1023/A:1022967619993](https://doi.org/10.1023/A:1022967619993).
- Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S., Yoshimi N., Tanaka H., Enome S. Full-automatic radiopolarimeters for solar patrol at microwave frequencies. *Proc. The Research Institute of Atmospheric Physics, Nagoya University*. 1979, vol. 26, p. 129.
- Treumann R.A. The electron-cyclotron maser for astrophysical application. *Astron. Astrophys. Rev.* 2006, vol. 13, pp. 229–315. DOI: [10.1007/s00159-006-0001-y](https://doi.org/10.1007/s00159-006-0001-y).
- Tritschler A., Rimmele T.R., Berukoff S., Casini R., Kuhn J.R., Lin H., Rast M.P., Mc-Mullin J.P., Schmidt W., Wöger F., DKIST Team. Daniel K. Inouye Solar Telescope: High-resolution observing of the dynamic Sun. *Astronomische Nachrichten*. 2016, vol. 337, p. 1064. DOI: [10.1002/asna.201612434](https://doi.org/10.1002/asna.201612434).
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Guarnieri F.L., Gopalswamy N., Grande M., et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, no. A07S01. DOI: [10.1029/2005JA011273](https://doi.org/10.1029/2005JA011273).
- Tsurutani B.T., Verkhoglyadova O.P., Mannucci A.J., Lakhina G. S., G. Li, Zank G.P. A brief review of solar flare effects on the ionosphere. *Radio Sci.* 2009, vol. 44, RS0A17. DOI: [10.1029/2008RS004029](https://doi.org/10.1029/2008RS004029).
- Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. 17 GHz neutral line associated sources: Birth, motion, and projection effect. *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2006, vol. 58, p. 21–28. DOI: [10.1093/pasj/58.1.21](https://doi.org/10.1093/pasj/58.1.21).
- Uralov A.M., Grechnev V.V., Rudenko G.V., Rudenko I.G., Nakajima H. Microwave neutral line associated source and a current sheet. *Solar Phys.* 2008, vol. 249, pp. 315–335. DOI: [10.1007/s11207-008-9183-y](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9183-y).
- Wang Z., Gary D.E., Fleishman G.D., White S.M. Coronal magnetography of a simulated solar active region from microwave imaging spectropolarimetry. *Astrophys. J.* 2015, vol. 805, iss. 2, article id. 93, 13 p. DOI: [10.1088/0004-637X/805/2/93](https://doi.org/10.1088/0004-637X/805/2/93).
- Yan Y., Zhang J., Wang W., Liu F., Chen Z., Ji G. The Chinese Spectral Radioheliograph — CSRH. *Earth, Moon, and Planets*. 2009, vol. 104, iss. 1–4, pp. 97–100. DOI: [10.1007/s11038-008-9254-y](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9254-y).
- Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., Ivanova V., Syrovatskii S., Podlesnyi A. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS and HF radio wave propagation. *Space Weather*. 2018, vol. 16, pp. 1013–1027. DOI: [10.1029/2018SW001932](https://doi.org/10.1029/2018SW001932).
- Yaya P., Hecker L., Dudok de Wit T., le Fèvre C., Bruinsma S. Developing new space weather tools: Transitioning fundamental science to operational prediction systems. *J. Space Weather Space Climate*. 2017, vol. 7, iss. A35. DOI: [10.1051/swsc/2017032](https://doi.org/10.1051/swsc/2017032).
- Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F., Gopalswamy N., Huttunen E., Kasper J.C., Nitta N.V., Poomvises W., Thompson B.J., Wu C.-C., Yashiro S., Zhukov A.N. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, iss. A10, citeID A10102. DOI: [10.1029/2007JA012321](https://doi.org/10.1029/2007JA012321).
- Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 1, pp. 287–294. DOI: [10.1007/s11207-014-0553-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0553-3).
- URL: <http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php> (accessed October 20 2019).
- URL: <https://www.ngdc.noaa.gov> (accessed October 20 2019).
- URL: <https://solar.nro.nao.ac.jp/norp> (accessed September 20 2019).
- URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606> (accessed September 20 2019).

Как цитировать эту статью:

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В., Губин А.В., Кочанов А.А., Гречнев В.В., Иванов Е.Ф., Кобец В.С., Мешалкина Н.С., Муратов А.А., Просовецкий Д.В., Мышьяков И.И., Уралов А.М., Федотова А.Ю. Многоволновый сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003).