

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА И ОКОЛОЗЕМНЫЙ КОСМОС. Ч. 1.

Г.Я. Смольков

SOLAR RADIO EMISSION AND NEAR-EARTH SPACE. P. I.

G.Ya. Smolkov

Радиоизлучение Солнца не приносит заметной энергии в межпланетную среду и в окрестности Земли. Поэтому прямого воздействия на околоземную и геофизическую обстановку оно не оказывает, но содержит очень полезную информацию о событиях в солнечной атмосфере, определяющих характер развития солнечно-земных связей и условий космической погоды. Она в основном согласуется с данными, получаемыми наземными и орбитальными обсерваториями в других диапазонах длин волн, может существенно их дополнять, но может быть и единственным источником сведений о процессах, происходящих на Солнце. В радиоизлучении эффективно проявляются процессы накопления и трансформации магнитной энергии, зарождение и особенности развития активных областей, вспышек и выбросов корональной массы, формирование и ускорение потоков энергичных частиц, ударные волны в солнечной атмосфере и гелиосфере, корональные дыры и др. Радиопризнаки подготовки вспышек и особенности их радиоспектров позволили существенно развить научные основы прогнозирования вспышек и выбросов корональной массы, степени и характера их геоэффективности. Эффективность использования такой информации зависит от методов и техники регистрации солнечного радиоизлучения, уровня его интерпретации и искусства радиодиагностики потенциальной геоэффективности солнечных событий. Мониторинг солнечной активности в радиоизлучении не зависит от погодных условий. При этом в короне наблюдаются проявления всех форм солнечной активности, причем, что особенно важно, на фоне солнечного диска с локализацией начала событий и динамики их развития. Оценивать напряженность магнитного поля в короне можно до сих пор только по характеристикам ее радиоизлучения. Способ прогноза на основе радиоданных существенно эффективнее по сравнению с прогнозированием по оптическим данным. Принимаются меры для совершенствования солнечных инструментов, создания солнечных радиотелескопов нового поколения.

Solar radio emission does not bring appreciable energy into interplanetary medium and near-Earth space. Therefore, it does not influence directly on the environment and geophysical conditions but it contains very useful information of events in a solar atmosphere determining character of development of solar-terrestrial connections and space weather conditions. In general it is coordinated with data received at ground and orbital observatories in other wavelength ranges, can essentially supplement them, but can be the only source of information about processes occurring on the Sun. Processes of accumulation and transformation of magnetic energy, origin and features of development of active regions, flares and coronal mass ejections (CME), formation and acceleration of fluxes of energetic particles, shock waves in a solar atmosphere and heliosphere and coronal holes effectively manifest themselves in radio emission. Radiosigns of background of flares and peculiarities of their radio spectra make it possible to develop essentially scientific bases for prediction of flares, CME, degree and character of their geoefficiency. The efficiency of using such information depends on methods and engineering of solar radio emission registration, level of its interpretation and skills in radio diagnostics of potential geoefficiency of solar events. The solar activity monitoring in radio radiation does not depend on weather conditions. At the same time manifestations of all types of solar activity are observed in corona, and, that is especially important, they are observed on solar disk background with localization of event beginnings and dynamics of their evolution. Until now magnetic field strength in corona can be estimated only using its radio emission characteristics. The method of forecast with the use of radio data is essentially more effective as compared with optical way. There is taken action on modernization of solar radio telescopes and construction of new generation ones.

Введение

Состояние околоземного космоса определяется совокупностью событий, *начинающихся* в солнечной атмосфере, *возбуждающих* последовательность переходных физических процессов различной природы в гелиосфере, межпланетной среде, окрестностях Земли, *возмущающих* ее магнитосферу, *обусловливающих* образование ионосферы, *провоцирующих* магнитосферно-ионосферные и ионосферно-магнитные взаимодействия, *определяющих* состояние атмосферы. Все они в той или иной мере определяют условия реализации многих наземных и орбитальных технологий, а также воздействуют на жизнедеятельность человека.

Солнечная активность проявляется в многообразных формах геоэффективного электромагнитного излучения и потоков солнечного ветра: активные области, вспышки, активизация волокон и выбросы корональной массы, ударные волны, потоки энергичных частиц, корональные дыры и др. Электромагнитное излучение вспышки достигает Земли через 8 мин, а спорадические потоки солнечного ветра – спустя несколько дней. Следовательно, чтобы опре-

делить текущее состояние околоземного космоса, необходимо знать, что было на Солнце до этого, хотя бы неделю назад. А чтобы подготовить прогноз ожидаемого состояния радиационной безопасности и геофизической обстановки, надо знать, что происходит на Солнце в настоящее время и что было на Солнце в течение последней недели. Необходимо учитывать также эффекты направленности спорадических процессов в солнечной атмосфере и расположение Земли относительно Солнца.

Для совершенствования научных основ прогнозирования солнечно-земных связей исследования выполняются на протяжении многих десятилетий по согласованным программам под эгидой международных научных организаций в широком диапазоне электромагнитного спектра, начиная от γ -излучения до излучения в гектометровом диапазоне длин волн, так же как измерения низкоэнергичной и высокоэнергичной компонент солнечной плазмы и ускоренных частиц. Однако непрерывная изменчивость солнечной активности и, следовательно, ее последствий, сильно выраженная индивидуальность проявления событий одного класса, неполное и даже

порой неудовлетворительное знание их природы еще не позволяют однозначно предсказывать степень и характер изменения условий космической погоды, сохраняют необходимость выполнения мониторинга, причем, учитывая планетарный характер геофизических откликов, круглосуточно, объединенными усилиями обсерваторий заинтересованных стран. Вообще говоря, эти проблемы невозможно решить без мониторинга солнечной активности во всех диапазонах электромагнитного излучения наземными и орбитальными обсерваториями, прямой регистрации потоков солнечного ветра, ударных волн, напряженности и ориентации магнитного поля в окрестностях Земли. Наша страна, расположенная в обширном долготно-широтном интервале на средних и высоких широтах, нуждается в знании и учете условий космической погоды для успешной реализации определенных наземных и орбитальных технологий.

Земная атмосфера прозрачна и допускает возможность регулярных наземных наблюдений Солнца в двух интервалах спектра его электромагнитного излучения – оптическом и радио диапазонах. Интервал длин волн второго намного превосходит ширину первого. Но энергия кванта в радиодиапазоне настолько мала, что радиоизлучение не приносит заметной энергии в межпланетную среду и в окрестности Земли. Поэтому прямого воздействия на околоземную и геофизическую обстановку оно не оказывает. Однако радиоизлучение содержит обширную и очень полезную информацию о событиях, происходящих во всех слоях солнечной атмосферы и определяющих состояние и характер развития солнечно-земных связей. Эта информация в основном согласуется с данными, получаемыми наземными и орбитальными обсерваториями в других диапазонах длин волн, может существенно их дополнять, но может быть и единственным источником сведений о процессах, происходящих на Солнце, поскольку мониторинг солнечной активности в радиоизлучении не зависит от погодных условий. Следовательно, можно не упускать внезапные быстро протекающие события и регистрировать эволюционные изменения. При этом наблюдаются проявления всех форм солнечной активности, причем, что особенно важно, локализация, фиксации времени начала и особенностей развития событий в короне на фоне солнечного диска. Поэтому исследования солнечного радиоизлучения занимают в солнечно-земной физике свою определенную «нишу».

Радиоизлучение Солнца обязано реализации в условиях его атмосферы тепловых и нетепловых, когерентных и некогерентных механизмов [1, 2]. Поэтому в нем эффективно проявляются процессы выноса, накопления и трансформации магнитной энергии, зарождение и особенности развития активных областей, вспышек и выбросов корональной массы, формирование и ускорение потоков энергичных частиц, ударные волны в солнечной атмосфере и гелиосфере, корональные дыры и др. Оценивать напряженность магнитного поля в короне (особенно на фоне солнечного диска) возможно до сих пор только по характеристикам ее радиоизлучения. Ра-

диопризнаки подготовки геоэффективных динамических и особенности их радиоспектров позволили существенно развить научные основы прогнозирования вспышек и выбросов корональной массы, степени и характера их геоэффективности [3–11]. Эффективность использования такой информации зависит от методов и техники регистрации солнечного радиоизлучения, уровня его интерпретации и искусства радиодиагностики потенциальной геоэффективности солнечных событий. Непрерывное повышение требований к качеству и информативности регистрируемых данных обязывают принимать меры для совершенствования уже используемых инструментов, а также для создания солнечных радиотелескопов нового поколения.

Прогноз обстановки в околоземном космосе по радиоизлучению Солнца

Рассмотрим возможности предсказания возмущений околоземного космоса по данным радиоастрофизического мониторинга солнечной активности (для краткости на примере некоторых российских обсерваторий). Поэтому далее внимание будет уделено только тем геоэффективным событиям, которые связаны с процессами накопления и выделения энергии в солнечной атмосфере и с распространяющимися возмущениями в ней.

Типы возмущений. В зависимости от природы агентов, вызывающих те или иные возмущения, последние могут быть разделены на три группы:

1. Явления, которые наблюдаются практически *одновременно* с регистрацией событий на Солнце: резкие понижения уровня наблюдаемого на Земле космического радиоизлучения; внезапные ослабления и прекращения приема коротковолновых радиостанций; исчезновение сигналов, отраженных от ионосферных слоев E и F; фазовые аномалии в распространении длинных волн и повышение уровня атмосфериков. Все эти эффекты, объединяемые под названием *внезапных ионосферных возмущений*, обусловлены действием ионизирующей (рентгеновской и ультрафиолетовой) части спектра электромагнитного излучения.

2. Явления, которые происходят *со сдвигом от нескольких десятков минут до десятков часов* относительно солнечных событий. К ним относятся вспышки солнечных космических лучей, рост поглощения радиоволн в полярных районах, полярные сияния. Такие события вызваны действием потоков солнечных частиц – протонов с энергией порядка десятков МэВ и в редких случаях до десятков и сотен ГэВ, а также релятивистских электронов. По достижении окрестности Земли эти частицы создают *повышенную радиационную опасность* для пилотируемых космических полетов, оборудования космических аппаратов и спутников, а также для полетов на высотных самолетах.

3. Явления *с задержкой на 2–4 суток* относительно вспышек. Это геомагнитные бури с внезапным началом и соответствующие эффекты в ионосфере. Агентами, порождающими такие эффекты, являются корональные выбросы массы (КВМ или CME) и ударные волны (УВ) [8].

Предвестники солнечных вспышек в радиодиапазоне. Прогноз явлений *первой группы* (внезапных ионосферных возмущений) сводится по существу к *прогнозу солнечных вспышек*. Поиск радиопредвестников солнечных вспышек проводится главным образом в см- и дм-диапазонах, так как области взрывного энерговыделения располагаются в хромосфере и переходной области хромосфера-корона [см., например, 10,11]. Работы выполняются в следующих двух направлениях.

Статистические исследования связи различных радиоявлений или их особенностей со вспышками. В НИРФИ отмечен факт увеличения числа микровсплесков перед мощными вспышками и отличия в форме спектров радиовсплесков (так называемые W- и V-спектры), отражающие характер вспышки, которая сопровождалась данными всплесками. Разработан метод краткосрочного (до 2–3 дней) прогнозирования протонных солнечных вспышек по динамике долгопериодных квазипериодических пульсаций потока солнечного радиоизлучения в см-диапазоне с характерным временем > 20 мин. На основе совокупности таких данных был предложен алгоритм прогноза протонных вспышек. Оценка эффективности разработанного метода по результатам экзаменационных испытаний (общее число прогнозов 367, из них 36 прогнозов вспышек) показала, что предложенный алгоритм имеет статистически значимое превышение над оправдываемостью тривиальных прогнозов [4, 12–14].

Кроме того, по данным шести геомагнитных станций, разнесенных на 160 градусов по долготе и 16 градусов по широте обнаружена связь между долгопериодными пульсациями солнечного ионизирующего излучения и магнитного поля Земли перед мощными вспышками. В магнитоспокойные периоды, предшествующие вспышкам, обнаружены долгопериодные ($20 \text{ мин} < T < 200 \text{ мин}$) пульсации N-компонента магнитного поля Земли, коррелирующие с аналогичными предвспышечными пульсациями радиоизлучения Солнца. Синхронность таких пульсаций служит как доказательством воздействия на ионосферу пульсаций лучистого излучения Солнца, так и свидетельством, что одним из косвенных критериев пульсаций ионизирующего излучения Солнца может являться микроволновое излучение. Проведенные исследования позволили показать возможность прогнозирования вспышек по геомагнитным характеристикам [15].

Другой особенностью радиоизлучения активных областей на Солнце, позволяющей давать предварительную оценку общего уровня солнечной активности, является тонкая структура спектра, обусловленная наличием токовых слоев и их вспышечной активностью [16]. По данным ежедневных измерений потоков солнечного радиоизлучения в широком диапазоне длин волн показано, что протонным событиям предшествуют, как правило, широкополосные предвестники, т.е. наблюдаемые в большей части всего см-дм-диапазона наблюдений. Наблюдается резкое отличие в широкополосных предвестниках протонных и непотонных событий (среднее время большинства первых > 30 мин, а вторых < 30 мин).

Установлена также связь между распределением числа широкополосных предвестников для солнечных протонных событий с различным баллом. Предвестники протонных событий с высоким баллом (> 2) обладают в большинстве случаев большей длительностью [17, 18].

Найдены закономерности характера нестационарного солнечного радиоизлучения в периоды, предшествующие регистрации КВМ. Результаты исследований показывают, что большинству случаев регистраций КВМ предшествует с заблаговременностью до 10–70 мин нестационарные явления в широком интервале частот радиоизлучения. Их характерные черты – одновременность импульсных всплесков, наличие явлений типа постепенного нарастания и спада (GRF) и вариаций шумовых бурь в метровом диапазоне длин волн [6].

Локализация областей накопления и высвобождения энергии в солнечной атмосфере. Радиогелиографический мониторинг солнечной активности позволил перейти к систематическому анализу структуры активных областей с относительно высоким пространственным разрешением [19–20]. В сочетании с высоким временным разрешением и высокой чувствительностью такой мониторинг в широком диапазоне частот позволяет исследовать детальную пространственно-временную картину зарождения и эволюции вспышечных областей [7, 21, 22], выход новых магнитных потоков в корону, эффекты взаимодействия магнитных потоков на различных стадиях эволюции активной области [21–23], а также выявить признаки подготовки мощных событий и развития переходных процессов [7], провести регистрацию момента и положения области первичного энерговыделения [24, 25], СМЕ [9, 26, 27] и других динамических процессов (например, пульсаций микроволнового излучения – признаков колебаний петель магнитного поля активной области [28–30]. Такая информация необходима для построения физически обоснованной модели солнечных вспышек и СМЕ [31–34], алгоритма их прогнозирования. Она позволяет проследить особенности образования и эволюции корональных дыр [35], вспышечно-продуктивных активных областей, предложить способ прогноза мощных вспышек по аномальному распределению поляризации микроволнового излучения активных областей с учетом их магнитного класса и ориентации структуры относительно солнечного экватора [5]. Следует отметить, что способы прогноза по радиоданным позволяют (в отличие от оптических) судить о возможном развитии вспышек и их геоэффективности при расположении активных областей вдали от центрального меридиана и даже еще за лимбом или уже за ним. Дальнейшее развитие и успехи радиогелиографической диагностики солнечных факторов, определяющих условия космической погоды, связаны с выполнением одновременной регистрации распределения интенсивности, поляризации и характера спектра радиоизлучения с высоким пространственным, временным и спектральным разрешениями на одном инструменте – радиогелиографе нового поколения [36–38].

Количественная диагностика солнечных протонных вспышек

Для прогнозирования явлений *второй и третьей групп* (с задержками несколько десятков минут–десять часов и на 2–4 суток) большое значение имеет так называемая *количественная диагностика вспышек*. Она состоит в том, чтобы по наблюдениям уже происходящей вспышки определить, какими из указанных возмущений может сопровождаться вспышка, каковы их характеристики, какие геофизические эффекты, когда и какой мощности ожидать при достижении этими возмущениями окрестности Земли. Следовательно, диагностика вспышек представляет собой один из подходов к *проблеме прогнозирования геофизических эффектов солнечных вспышек*. Решающую роль при решении этих задач играет информация о радиоизлучении, сопровождающем солнечные вспышки. Используются установленные связи между типами всплесков радиоизлучения и геоэффективными событиями, возникающими во время или вследствие солнечных вспышек [2, 3, 7, 8]. Дело не только в том, что радиоизлучение по сравнению с другими видами электромагнитного излучения отличается простотой и доступностью наблюдений. *Принципиальным преимуществом радиоизлучения* является то, что в радиодиапазоне излучение на различных частотах генерируется на разных высотах в солнечной атмосфере (от хромосферы до внешней короны).

Данные о радиовсплесках в связи с диагностикой протонных вспышек рассматривались во многих работах. Но в наиболее полной мере основные преимущества радиоизлучения были использованы в методике ИЗМИРАН [39–41]. При этом микроволновые всплески (интенсивность, частотный спектр), возникающие в хромосфере и нижней короне, используются как источник информации об эффективности ускорения частиц во вспышках (интенсивность потоков протонов и их энергетический спектр). С другой стороны, всплески метрового и декаметрового диапазонов, генерация которых происходит в короне, используются для получения информации об условиях выхода частиц в межпланетное пространство. Методика основана на результатах анализа закономерностей, характеризующих связь параметров потоков протонов с энергией $E > 10, 30$ и 60 МэВ, наблюдаемых в околоземном космическом пространстве после определенной вспышки на диске Солнца, с параметрами соответствующих радиовсплесков в сантиметровом и метровом диапазонах. Она включает в себя два основных этапа: а) определение протонности данной вспышки на базе сформулированного критерия «да – нет» и б) расчет ожидаемых параметров потоков протонов у Земли в случаях, когда вспышка признана протонной. При этом расчету подлежат все основные параметры потоков протонов: максимальная интенсивность потоков протонов в каждом из энергетических диапазонов, показатель энергетического спектра протонов, а также временные параметры – задержки моментов начала возрастания потоков частиц у Земли от данной вспышки и наступления максимума интенсивности потока относительно

времени максимума микроволнового всплеска, постоянная экспоненциального затухания. Все эти параметры определяются параметрами радиовсплесков и гелиодолготой вспышки.

Проверка методики на значительном независимом материале – данных о радиовсплесках и потоках протонов за 1970–1980 гг. – показала, что коэффициент корреляции между расчетной J_p и наблюдаемой J_n величинами интенсивности потока протонов для $E > 10$ МэВ составляет $r \sim 0.85$. При этом во всех энергетических диапазонах различие между J_n и J_p в 75–85 % протонных явлений не превышает фактор 2. Далее, коэффициент корреляции между расчетными и наблюдаемыми значениями наиболее важного временного параметра – задержки момента максимума потока протонов относительно вспышки – для $E > 10$ МэВ составляет $r \sim 0.96$. В целом общий характер расчетных временных профилей потока протонов в большинстве случаев близок к наблюдаемому.

Другим важным с практической стороны аспектом количественной диагностики солнечных протонных вспышек является заблаговременная оценка величины поглощения коротких радиоволн в полярных районах (типа ПППШ). В принципе, величину поглощения можно рассчитать по известным характеристикам потоков протонов (временной профиль потока, энергетический спектр). Однако, используя ту же идеологию, оказалось возможным получать оценку величины поглощения по параметрам радиовсплесков. Коэффициент корреляции между расчетными и наблюдаемыми амплитудами поглощения составил $r \sim 0.80$ [42–43]. Таким образом, на основе радиоданных в момент близкий к максимуму вспышки, можно прогнозировать амплитудные и временные параметры потока протонов вблизи Земли, показатель энергетического спектра и амплитуду поглощения ПППШ. Заблаговременность такого прогноза составляет от десятков минут до десятков часов.

Для дальнейшего развития методов диагностики протонных вспышек необходимо более детальное изучение физических механизмов ускорения, выхода и распространения частиц, а также исследование проявлений этих процессов в различных областях спектра электромагнитного излучения.

Диагностика геоэффективных вспышек

Для прогнозирования явлений *третьей группы* (задержки на 2–4 сут) необходимо иметь информацию об ударных волнах и потоках плазмы, распространяющихся в межпланетном пространстве. Последние могут быть связаны как с корональными выбросами массы, так и с исчезающими волокнами на диске Солнца. Решающую роль при решении этих задач играет информация о радиоизлучении, сопровождающем эти возмущения. Так, например, если СМЕ могут наблюдаться как в радиодиапазоне, так и на коронографах в белом свете, то ударные волны в солнечной короне проявляют себя только в радиоизлучении.

Связь между параметрами КВМ и характеристиками микроволновых всплесков подчиняется определенным закономерностям (на плоскости макси-

мальная плотность потока микроволнового всплеска – длительность всплеска), позволяющим выделить ряд зон, в которых сосредоточены события без КВМ и события с КВМ. Так, событиям с КВМ соответствуют в основном неимпульсные (с эффективной длительностью $> 1-2$ мин) радиовсплески с интенсивностью ≥ 100 с.е.п. и всплески сравнительно небольшой интенсивности ($10-100$ с.е.п.), но значительной продолжительности (> 20 мин), относящихся к событиям типа GRF. Зону импульсных и квазиимпульсных всплесков можно характеризовать как зону событий без КВМ или событий с КВМ малых угловых размеров, с умеренной скоростью и незначительной или умеренной массой [44].

Сами КВМ и ударные волны при распространении в солнечной короне генерируют радиоизлучение в метровом диапазоне – всплески II и IV типа. Радиовсплески этих типов уже давно служат одним из признаков, по которым проводится качественная диагностика геоэффективных вспышек. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных исследованиям связи КВМ с радиовсплесками II и IV типа, количественный критерий геоэффективных вспышек отсутствует до сих пор. В частности, нерешенными остаются вопросы о взаимосвязи ударных волн в солнечной короне и в межпланетной среде, о типе ударных волн в короне (перпендикулярная или параллельная) и др. Тем не менее, радиоспектрографические наблюдения в метровом диапазоне (проводимые в настоящее время в нашей стране только в ИЗМИРАН) позволяют по величине частотного дрейфа получать оценку скорости ударных волн в солнечной короне и прогнозировать момент ее прихода к Земле. Такие оценки особенно ценны в тех случаях, когда согласно наблюдениям на коронографах КВМ типа гало распространяются от Солнца по направлению к Земле и оценки их скорости по наблюдениям в белом свете невозможны.

Заключение

Радиоизлучение Солнца содержит очень ценную и разнообразную информацию о физических процессах, протекающих во всех слоях его атмосферы. Радиоизлучение в микроволновом и дециметровом диапазонах характеризует эволюцию активных областей от их зарождения до разрушения, процессы накопления энергии в токовых слоях и акты первичного выделения энергии во время вспышек, процессы зарождения корональных выбросов массы. Радиоизлучение на метровых волнах содержит информацию о физических параметрах солнечной короны и распространяющихся в ней возмущениях (КВМ, УВ, потоки ускоренных частиц). Именно с этим связана высокая эффективность использования радиоданных для целей диагностики протонных и геоэффективных солнечных вспышек и, как следствие, для прогнозирования радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и геофизических эффектов.

Естественно, при решении проблем космической погоды радиоданные должны использоваться в сочетании с другими наблюдениями (в белом свете, рентгене, ультрафиолете и т.д.) [45, 46], так как они являются взаимно дополняющими друг друга (хотя

в некоторых ситуациях радиоданные являются единственным источником информации о процессах в солнечной короне и межпланетной среде). Поэтому мониторинг солнечной активности и исследования ее проявлений в радиодиапазоне не только не теряют своей актуальности в физике Солнца и солнечно-земных связей, но и приобретают все большее значение. Необходимым условием практической реализации этой программы является использование оперативной и круглосуточной наземной службы радиоизлучения Солнца (интегральный поток, поляризация, динамические спектры, детальная морфология и динамика событий) в широком диапазоне частот на проблемно ориентированных больших инструментах, а также углубленный физический анализ процессов в солнечной атмосфере.

Относительная близость Солнца позволяет детально изучать строение и эволюцию его атмосферы, происходящие в ее слоях процессы, решать актуальные научные и прикладные проблемы космической физики. Разнообразие физических условий в солнечной атмосфере используется для радиоастрофизических исследований плазменных и магнито-гидродинамических процессов в естественных пространственных, временных и энергетических масштабах, недоступных в наземных лабораториях [47].

Работы Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в этом направлении поддерживаются Сибирским отделением РАН и Минобрнауки РФ: ФНТП «Астрономия», «Уникальные установки» – 01-27 (ССРТ) и ведущих научных школ – НШ-477.2003.2/РИ-112/001/045, РФФИ №05-07-90209.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. Генерация и распространение. М.: Наука, 1977. 432 с.
2. Dulk G.A. Radio emission from the Sun and stars // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1985. V. 23. P. 169–224.
3. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Заблаговременное определение параметров потоков протонов от солнечных вспышек по данным о радиовсплесках // *Космическая биология и авиакосмическая медицина.* 1983. № 3. С. 69.
4. Семенова С.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. и др. Некоторые вопросы создания методики краткосрочного прогнозирования протонных вспышек по наблюдениям долгопериодных пульсаций солнечного радиоизлучения. Препринт НИРФИ, 1987. № 228. 29 с.
5. Максимов В.П., Бакунина И.А., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек // *Бюлл. Изобретений.* 1996. № 21. 131 с. Патент № 2114449 от 21.06.98 г.
6. Durasova M.S., Fridman V.M., Sheiner O.A. The precursors of CME onset in solar radioemission // *Proc. 9th EMSP, Florence.* 1999. 979 p.
7. Smolkov G.Ya., Maksimov V.P., Uralov A.M. Microwave signatures of solar flare buildup // *Adv. Space Sci.* 2000. V. 26. P. 193.
8. Смольков Г.Я., Фомичев В.В., Снегирев С.Д. Радиоизлучение Солнца и космическая погода // *Солнечно-земная физика.* 2002. Вып. 2. С. 31–35.
9. Uralov A.M., Grechnev V.V., Hudson H.S. Initial localization and kinematic characteristics of the structural components of a coronal mass ejection // *Journal of Geophys. Res.* 2005. V. 110, N A5 A05104. doi: 10.1029/2004JA010951.

10. Maksimov V.P., Prosovetsky D.V., Grechnev V.V. et al. On the relation of brightness temperatures in coronal holes at 5.7 and 17 GHz // Publ. Astron. Soc. Japan 2006 V. 58 – (accepted).
11. Uralov A.M., Rudenko G.V. 17 GHz Neutral Line associated Sources: Birth, Motion and Projection Effect // Publ. Astron. Soc. Japan 2006. V. 58 (accepted).
12. Максимов В.П., Просовецкий Д.В. Структура программы краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек // Труды Конференции стран СНГ и Прибалтики «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности» (2–7.06.03 г., Н. Новгород), С. 481.
13. Кобрин М.М., Коршунов А.И., Снегирев С.Д., Тимофеев Б.В. О резком возрастании квазипериодических компонентов флуктуаций наклона спектра радиоизлучения Солнца на волне 3 см в период, предшествующий активным событиям августа 1972 г. // Солнечные данные. 1973, № 10. С. 79.
14. Kobrin M.M., Pakhomov V.V., Snegirev S.D., Fridman V.M., Sheiner O.A. An Investigation of the relationship between long-period pulsations of CM radio emission and solar proton flare forecasts // Solar-Terrestrial Prediction-V (STPW-96). Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, 1996. Tokyo: RCW, 1997. P. 200.
15. Kobrin M.M., Malygin V.I., Snegirev S.D. Long-period pulsations of the earths magnetic field with periods more than 20 minutes before proton flares on the Sun // Plan. Space Sci. 1985. V. 33, N 11. P. 1251.
16. Каверин Н.С., Кобрин М.М., Коршунов А.И., Шушунов В.В. Тонкая структура в спектрах радиоизлучения локальных источников на Солнце в диапазоне 5.0–12.0 ГГц и токовые слои активных областей // Астрон. ж. 1980. Т. 57, № 4. 767 с..
17. Дурасова М.С., Подстригач Т.С., Фридман В.М., Шейнер О.А. Исследование предвспышечных ситуаций по спектральным данным потоков радиоизлучения Солнца за 1970–1994 гг. // Изв. Вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 11–12, 1425 с..
18. Дурасова М.С., Подстригач Т.С., Тихомиров В.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. Исследование предвспышечной солнечной активности по данным радиослужбы Солнца. Препринт НИРФИ. 1996. № 419. 78 с..
19. Смольков Г.Я. Новое в микроволновом излучении солнечных активных областей // УФН. 1993. Т. 163, № 1. С. 102.
20. Алтынцев А.Т., Богод В.М. Радионаблюдения на крупных инструментах и космическая погода // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 2. С. 26.
21. Нефедьев В.П., Потапов Н.Н., Смольков Г.Я. О возможном проявлении процесса накопления энергии, связанного с мощными вспышками // Иссл. по геомагн., аэрон. и физ. Солнца. М.: Наука, 1984. Вып. 68. С. 84.
22. Uralov A.M., Sych R.A., Shchepkina V.L. et al. Weakly polarized microwave sources in active regions prior to large X-ray flares // Solar Phys. 1998. V. 183. P. 359.
23. Смольков Г.Я., Максимов В.П., Уралов А.М. Радиогелиографическая диагностика предвспышечного состояния активных областей // Труды 7-го Симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ, Троицк, 1999. С. 17G.
24. Altyntsev A.T., Dutov A.A., Grechnev V.V. et al. Millisecond-duration microwave burst observations with the SSRT Fast Data Acquisition System // Solar Phys. 1996. V. 168. P. 145.
25. Алтынцев А.Т., Гречнев В.В., Коновалов С.Н. Микроволновые субсекундные всплески: наблюдения с пространственным разрешением // Структура и динамика солнечной короны, Троицк, ИЗМИРАН. 2000. С. 211.
26. Maksimov V.P., Nefedyev V.P. The observation of a «negative burst» with high spatial resolution // Solar Phys., 1991. V. 136. P. 335.
27. Maksimov V.P., Nefedyev V.P. Some possibilities of microwave diagnostics of eruptive prominences // Ann. Geophysicae. 1992. V. 10. P. 354.
28. Grechnev V.V., White S.M., Kundu M.R. Quasi-periodic pulsations in a solar microwave burst // Astrophysical Journal. 2003. 588. P. 1163–1175.
29. Gelfrekh G.B., Tsevetkov L.I., Yurovsky Y.F. et al. On the microwave oscillations from active region NOAA 0139 // Proc. IAU Symp. N 223, 2004 Eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, A.G. Kosovichev). IAU. P. 243–244.
30. Sych R.A., Yan Y. Automated detection of fast pulsation in solar dynamic radio spectra using wavelet analysis // Abstracts of VI Chinese-Russian workshop on Space Weather (Oct. 11–16, 2005, Qingdao, China). P. 141.
31. Maksimov V., Prosovetsky D. Structure of the program of short-term prediction of powerful solar flares // Chin. J. of Space Physics. 2005. V. 25. P. 329–332.
32. Maksimov V.P., Shchepkina V.L., Chernova E.A. Some properties of microwave emission from flaring regions // Chin. J. Space Sci. 2005. V. 25. P. 419–423.
33. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Эволюция магнитного поля над активной областью в предвспышечном состоянии // Сб. докладов конференции Солнечная активность как фактор космической погоды IX ежегодная Пулковская конференция по физике Солнца, июль 2005, Пулково, Санкт-Петербург (в печати).
34. Grechnev V.V., Zandanov V.G., Uralov A.M., et al. Observations of CME-related phenomena in a wide spectral range // Solar Phys. V. 225, 225(2), P. 379–401.
35. Криссинель Б.Б., Кузнецова С.М., Максимов В.П. и др. Особенности микроволнового излучения корональных дыр // Изв. РАН. Сер. физ. 2000. Т. 64, № 9. С. 1862.
36. 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(1), P. 239–272.
37. Smolkov G.Ya., Zandanov V.G., Altyntsev A.T. Towards the creation of a new-generation radioheliograph // Proc. of SPIE. 2000. V. 4015, P. 197.
38. Lesovoi S., Zandanov V., Smolkov G., et al. Upgrading of the Siberian solar radio telescope // New instrumentation for radiophysics of the Sun and heliosphere. EGU 1st General Assembly (Nice, France, 25–30 April 2004), P. 347.
39. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Определение параметров солнечных протонов в окрестности Земли по радиовсплескам // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т. 17, № 1. С. 10; там же. С. 177.
- 40а. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Оценки интенсивности солнечных протонов по интегральным параметрам микроволновых радиовсплесков // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18, № 4. С. 577.
- 40б. Акиньян С.Т., Черток И.М. Определение величины поглощения типа ППШ по интегральным параметрам солнечных микроволновых радиовсплесков // Геомагнетизм и аэрономия, 1980. Т. 20, № 2. С. 192.
41. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Заблаговременное определение параметров потоков протонов от солнечных вспышек по данным о радиовсплесках // Косм. биология и авиакосм. медицина. 1983, № 3. С. 69.
42. Фомичев В.В., Черток И.М. Сопоставление данных о потоках протонов у Земли с результатами диагностики солнечных протонных вспышек по радиовсплескам // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28, № 3. С. 353.
43. Фомичев В.В., Черток И.М., Дель Посо Э. Определение показателя энергетического спектра потоков протонов у Земли по частотному спектру солнечных микроволновых всплесков // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 4. С. 545.
44. Жулина Е.М., Черток И.М. Оценки поглощения типа РСА по характеристикам солнечных радиовсплесков // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19, № 1. С. 18.

45. Черток И.М., Гнездилов А.А., Заборова Е.П. Микроволновое и мягкое рентгеновское излучение солнечных вспышечных событий, связанных с корональными транзитами // *Астрон. ж.* 1992. Т. 69. Вып. 3, С. 593.

46. Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Dual-filament Initiation of a Coronal Mass Ejection: Observations and Model // *Solar Phys.* 2002. V. 208. P. 69–90.

47. Смольков Г.Я. Изучение плазменных и магнито-гидродинамических процессов в солнечной короне по ее радиоизлучению // *Труды БМНШФФ, Иркутск: ИСЗФ,* 2004. С. 39–44.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск