

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физический институт им. П. Н. Лебедева

На правах рукописи

ГЛЯНЦЕВ Анатолий Владимирович

Исследование радиоисточников и крупномасштабной структуры
солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний вблизи минимума и
в фазе роста 23/24 цикла солнечной активности

(01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия)

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук Чашей Игорь Владимирович

Москва — 2016

Содержание

Введение.....	4
Обзор литературы по теме диссертации.....	4
Общая характеристика работы	13
Глава 1. Основы метода мерцаний, радиотелескоп БСА ФИАН и алгоритмы обработки данных	24
1.1. Основы метода межпланетных мерцаний	24
1.2. Радиотелескоп БСА ФИАН.....	30
1.3. Распознавание вклада мерцающих источников в сигнале, принятом радиотелескопом	32
1.4. Оценка индекса мерцаний одиночного радиоисточника	36
1.5. Выводы по главе 1.....	39
Глава 2. Межпланетные мерцания ансамбля слабых радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности.....	41
2.1. Методика и результаты наблюдений	41
2.2. Обсуждение результатов	45
2.3. Выводы по главе 2.....	47
Глава 3. Оценка угловых размеров радиоисточника по наблюдениям насыщенных межпланетных мерцаний	49
3.1. Методы оценки углового размера источника по наблюдениям межпланетных мерцаний	49
3.2. Впервые примененный метод оценки углового размера источника	51
3.3. Результаты наблюдений	53
3.4. Сравнение полученных оценок углового размера с известными данными	57
3.5. Выводы по главе 3.....	61
Глава 4. Детектирование выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний в 2011-2012 гг.....	62
4.1. Методы детектирования СМЕ	62
4.2. Способы детектирования СМЕ по наблюдениям межпланетных мерцаний..	63
4.3. Наблюдения и методика	67

4.4. Результаты и обсуждение.....	69
4.5. Выводы по главе 4.....	74
Глава 5. Оценка скоростей достигших Земли выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний в 2011-2012 гг.	75
5.1. Способы оценки скоростей выбросов корональной массы	75
5.2. Методика оценки скоростей СМЕ по наблюдениям мерцаний в 2011-2012 гг.	78
5.3. Результаты и обсуждение.....	78
5.4. Выводы по главе 5.....	83
Заключение	84
Список использованных сокращений	86
Использованная литература	88
Список иллюстративного материала.....	104

Введение

Обзор литературы по теме диссертации

Солнечный ветер представляет собой поток плазмы, непрерывно истекающий из Солнца под действием высокой температуры короны и дополнительных источников энергии-импульса. Область, из которой солнечный ветер вытесняет межзвездную плазму, имеет радиус ~ 100 а. е. и называется гелиосферой.

Косвенные свидетельства существования солнечного ветра были получены еще до первых космических запусков. Корпускулярным излучением Солнца объясняли наблюдаемые отклонения хвостов комет [1 – 4]. В 1955 г. было показано, что наблюдения линий железа в спектре короны Солнца на всех высотах свидетельствует о непрерывно истекающем из Солнца потоке вещества [5]. В 1957 г. было установлено, что давления межзвездной среды недостаточно для удержания короны в гидростатическом равновесии [6]. На существование солнечного ветра указывали также геомагнитные возмущения и временные вариации потока космических лучей. Впервые частицы солнечного ветра были непосредственно обнаружены советской межпланетной станцией «Луна 2» [7]. Первые длительные (три месяца) непрерывные измерения параметров межпланетной плазмы были проведены в 1962 г. космическим аппаратом Mariner 2 [8 – 10]. Эти измерения подтвердили, что имеется непрерывный поток плазмы, истекающий из Солнца со скоростями от 300 до 800 км/с. Дальнейшие исследования [11 – 15] позволили оценить скорость, плотность и другие параметры солнечного ветра. Вблизи орбиты Земли эти параметры в среднем составляют: скорость $V = 300 - 800$ км/с, концентрация $N = 5 - 10$ см⁻³, индукция магнитного поля $B \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Гс, температура протонов $T_p \approx 10^4 - 10^5$ К, температура электронов $T_e \approx 10^5$ К. Скорость солнечного ветра выше любой сигнальной скорости в нем (скорости звука, быстрого и медленного

магнитного звука, скорости альфвеновских волн). Поэтому сигнал от одной фиксированной точки пространства до другой может быть передан только с потоком солнечного ветра.

Параллельно с исследованием солнечного ветра с помощью космических аппаратов велось ее изучение методом радиопросвечивания. В 1951 г. В. В. Виткевич предложил исследовать межпланетную среду путем наблюдения просвечивающих ее дискретных радиоисточников [16]. Очевидны преимущества метода просвечивания по сравнению с прямыми измерениями с космических аппаратов. Во-первых, это относительно низкая стоимость. Во-вторых, радиопросвечивание позволяет исследовать области, слишком близкие к Солнцу для прямых измерений. В-третьих, наблюдение многих просвечивающих источников дает информацию о свойствах плазмы сразу во многих направлениях, в то время как космический аппарат измеряет свойства плазмы лишь там, где непосредственно находится. Недостаток метода радиопросвечивания тоже очевиден: свойства солнечного ветра изучаются не напрямую через регистрацию его частиц, а через воздействие их на проходящие радиоволны. Во-первых, при этом нужно учитывать влияние длины волны и параметров радиоисточника (в частности, его угловых размеров). Во-вторых, параметры плазмы могут меняться вдоль луча зрения на источник. В-третьих, некоторые параметры солнечного ветра (например, температуру) вообще не представляется возможным оценить методом радиопросвечивания.

Одни из первых наблюдений методом просвечивания были проведены для Крабовидной туманности [17], было обнаружено увеличение видимых угловых размеров туманности по мере ее приближения к Солнцу. Это означало наличие турбулентной плазмы за пределами солнечной короны. Обнаруженная область плазмы была названа сверхкороной Солнца. В дальнейшем этот вывод подтвердился по наблюдениям многих источников [18]. В 1964 г. были обнаружены мерцания радиоисточников на межпланетной плазме [19]. По наблюдениям мерцаний большого числа радиоисточников была определена скорость солнечного ветра, исследована глобальная структура межпланетной

плазмы и ее динамика в цикле солнечной активности [20 – 21]. Метод мерцаний позволил оценить характерные размеры неоднородностей в межпланетной плазме и амплитуду изменения электронной плотности [22 – 23]. По наблюдениям мерцаний из трех различных точек одновременно определяется форма и скорость движения неоднородностей, которая в отсутствие крупномасштабных возмущений близка к скорости солнечного ветра [24 – 29]. Наблюдения мерцаний позволили обнаружить крупномасштабные возмущения в межпланетной плазме (ударные волны) [30 – 33]. Были разработаны и применены методы оценки скорости солнечного ветра, угловых размеров просвечивающих источников и спектра турбулентности плазмы по спектру мощности мерцаний [34 – 37]. Методы определения скорости солнечного ветра были использованы для оценки скорости крупномасштабных возмущений [38 – 39].

В настоящее время продолжают исследования методом мерцаний крупномасштабной структуры солнечного ветра [40], оценки его скорости [41], детектирование крупномасштабных возмущений и оценка их скоростей [42], оценка угловых размеров просвечивающих источников [43]. Подробнее метод межпланетных мерцаний будет рассмотрен в гл. 1.

По данным радиопросвечивания [44 – 45] и прямых измерений [46 – 47] была изучена глобальная структура солнечного ветра. Показано, что концентрация плазмы с удалением от Солнца падает как $1/R^2$, где R – расстояние до Солнца [48]. Скорость солнечного ветра сначала возрастает с удалением от Солнца, а затем перестает зависеть от расстояния (режим сформировавшегося течения). Постоянство скорости в режиме сформировавшегося течения говорит о том, что действие внешних сил на поток солнечного ветра незначительно.

Выделено два типа солнечного ветра – быстрый (скорость вблизи Земли 700-800 км/с) и медленный (около 400 км/с). Быстрый солнечный ветер разреженнее медленного, так что поток массы у быстрого и медленного солнечного ветра отличается только на 20%. Источником быстрого солнечного

ветра, по современным представлениям, являются корональные дыры – области короны с открытыми силовыми линиями, расходящимися быстрее, чем радиально. Обнаружена корреляция скорости быстрого солнечного ветра, связанного с корональной дырой, с площадью этой дыры [49 – 50]. В минимуме солнечной активности крупные корональные дыры наблюдаются над полюсами Солнца, поэтому с высоких гелиоширот истекает быстрый солнечный ветер [51]. В минимуме активности быстрый солнечный ветер заполняет почти 80% гелиосферы [46]. Вращение Солнца создает в полярной короне токи, которые могут придавать солнечному ветру дополнительное ускорение [52 – 53]. В максимуме солнечной активности полярные корональные дыры исчезают, и со всех гелиоширот истекает медленный солнечный ветер. Корональные дыры и связанные с ними потоки быстрого солнечного ветра иногда наблюдаются и на средних гелиоширотах, сохраняясь в течение нескольких оборотов Солнца. Однако параметры корональной дыры, влияющие на характеристики испускаемого ветра, могут существенно меняться на масштабе суток и часов [54].

В минимуме солнечной активности магнитное поле Солнца близко к дипольному. Ось диполя близка к оси вращения Солнца, кроме короткого (1-2 года) периода в максимуме солнечной активности, когда северный и южный магнитные полюса меняются местами.

Взаимодействие этого поля с плазмой солнечного ветра приводит к образованию в плоскости экватора гелиосферного токового слоя, разграничивающего области с противоположной полярностью магнитного поля [55 – 57]. Суммарное магнитное поле Солнца и гелиосферного токового слоя называется межпланетным магнитным полем. Его средняя напряженность вблизи Земли составляет 5–10 нТл и зависит от фазы солнечного цикла. Полной картины электрических токов и магнитных полей в гелиосфере в настоящее время еще не построено [58].

Из-за высокой проводимости плазмы солнечного ветра межпланетное магнитное поле «вморожено» в плазму. Движение солнечного ветра и вращение

Солнца, накладываясь друг на друга, закручивают магнитное поле в спираль Архимеда.

Первые теоретические модели солнечного ветра [6, 59 – 61] были опубликованы еще до прямых измерений его параметров с помощью космических аппаратов. Наиболее известной из ранних моделей является модель Паркера [61 – 62]. В этой модели единственными силами, действующими на частицы солнечного ветра, считаются сила гравитации Солнца и градиент давления. Эта модель также пренебрегает вращением Солнца, нестационарными процессами в солнечном ветре, вязкостью плазмы и считает солнечный ветер изотермичным. Она описывает физику солнечного ветра в общих чертах (в частности, предсказывает качественный ход зависимости $v = v(R)$ скорости солнечного ветра от расстояния до Солнца). Однако количественные предсказания модели Паркера (в частности, о концентрации межпланетной плазмы вблизи Земли) расходятся с наблюдательными данными.

Дальнейшее развитие моделей солнечного ветра было связано с учетом факторов, которыми пренебрегает модель Паркера. В частности, учитывалась вязкость плазмы [63 – 68], межпланетное магнитное поле [69 – 73], изотермические модели заменялись политропными. Построено множество моделей солнечного ветра [74 – 85]. Ни одна из них не предсказывает всех наблюдаемых свойств солнечного ветра. На сегодня нет даже ясности в вопросе, является ли истечение звездного ветра типичным для звезд типа Солнца или вместо ветра может наблюдаться аккреция [85]. С другой стороны, многие важные для выбора модели свойства солнечного ветра пока не выяснены с нужной точностью.

Свойства солнечного ветра тесно связаны со свойствами короны, из которой он истекает. Корона имеет температуру порядка миллиона Кельвинов, в то время как нижележащая фотосфера – порядка тысяч. Обсуждаются разные механизмы нагрева короны: нагрев магнитогидродинамическими волнами, диссипация токов, магнитное пересоединение и др. Кроме того, солнечный ветер является турбулентным на всех наблюдаемых расстояниях от Солнца, включая

самые малые. Поэтому вероятно, что источник турбулентности солнечного ветра также лежит в короне. Возможно, что исчерпывающая теоретическая модель солнечного ветра может быть построена только вместе с моделью короны.

Все физические параметры солнечного ветра флуктуируют на всех доступных наблюдению пространственных и временных масштабах. По результатам измерений пространственные спектры магнитного поля, плотности и скорости представляют собой типичные спектры турбулентности [86 – 92]. А именно, имеется внешний масштаб турбулентности – масштаб структур, порождаемых источником турбулентности; инерционный интервал, в котором структуры каскадом дробятся на более мелкие, пока не достигают внутреннего масштаба турбулентности; внутренний масштаб – масштаб структур, разрушаемых диссипацией. Физическая природа этих структур окончательно не выяснена. Возможно, это нелинейные волны.

В инерционном интервале пространственный спектр электронной плотности имеет степенной вид [20]:

$$\Phi_{N_e} \propto \vec{q}^{-n}$$

Здесь Φ_{N_e} – пространственная спектральная плотность, \vec{q} – трехмерная пространственная частота. По радиоастрономическим данным показатель степени n близок к 3.5 [20]. Известны теоретические спектры с близкими значениями показателя степени, в частности спектр Колмогорова ($n = 11/3$), полученный для вихрей в несжимаемой жидкости, и спектр Крэнена ($n = 7/2$), полученный для нелинейных взаимодействий волн в слаботурбулентной плазме. В настоящий момент точности наблюдений не достаточно, чтобы определить, какой из этих двух спектров ближе к наблюдаемому. В последние годы показано также, что показатель степени пространственного спектра плотности высокоширотного быстрого солнечного ветра выше, чем медленного низкоширотного [43].

Одним из многочисленных проявлений солнечной активности являются выбросы корональной массы (coronal mass ejections, CME). Это выбросы

вещества солнечной короны массой $\sim 10^{15}$ г [93 – 94]. Распространение СМЕ в короне может сопровождаться эруптивными протуберанцами, радиовсплесками, выбросами ускоренных частиц и другими явлениями. Наиболее мощные СМЕ покидают атмосферу Солнца и распространяются в гелиосфере, становясь межпланетными выбросами корональной массы (ICME).

Частота появления СМЕ меняется со временем и хорошо коррелирует с циклом солнечной активности. По данным SOHO\LASCO за 2000-2012 гг., частота появления СМЕ, усредненная скользящим средним по году, менялась от 2 до 7 СМЕ в день; неусредненная частота достигала 18 СМЕ в день [95].

Кинематика СМЕ является предметом активного изучения. Анализ 11584 СМЕ, наблюдавшихся на LASCO в 1996-2006 гг., показывает, что скорости СМЕ распределены логнормально со средним ~ 400 км/с [96]. Необходимо помнить, что коронографы измеряют проекцию скорости на картинную плоскость, поэтому измеряемые значения являются нижней оценкой реальных скоростей.

Для понимания динамики СМЕ важна зависимость скорости СМЕ от времени или высоты над поверхностью Солнца. В короне эта зависимость может быть различной: есть примеры ускоряющихся, замедляющихся и сохраняющих постоянную скорость СМЕ [93]. Наблюдались также СМЕ, испытывающие квазипериодические осцилляции скорости с высотой вплоть до высот 30 солнечных радиусов, причем амплитуда осцилляций достигала 400 км/с [97]. На более значительных расстояниях скорость СМЕ падает с удалением от Солнца, что связано, во-первых, с увеличением массы СМЕ из-за сгребания передним фронтом окружающей межпланетной плазмы, а во-вторых, с силой сопротивления.

Как показывает статистика, СМЕ тесно связаны со вспышками в рентгеновском диапазоне. Вероятность того, что вспышка будет ассоциирована с СМЕ, зависит от мощности и продолжительности вспышки. По данным ранних исследований [98], вероятность того, что вспышка будет ассоциирована с СМЕ, возрастает от 7% до 100% при возрастании класса вспышки от В до Х, и от 6% до 50% при возрастании продолжительности вспышки от 1 до 6 ч. Отметим, что по

длительности вспышки распадаются на несколько типов, но, по результатам многолетних наблюдений 1976-2006 гг., подавляющее большинство вспышек длится не более часа [99]. В работе [100] на материале 1301 рентгеновской вспышки установлено, что вероятность ассоциации с СМЕ для вспышек С-, М- и Х-класса составляет 16-25%, 42-55% и 90-92%, соответственно. По данным [101] с СМЕ связано 90% вспышек класса Х, 30% вспышек класса М и 24% вспышек класса С. Как показывают эти данные, не все вспышки даже Х-класса связаны с СМЕ. В то же время и не все СМЕ связаны со вспышками. По данным [98, 102], со вспышками связано около половины СМЕ.

Природа связи вспышек и СМЕ активно изучается. Существуют три основные гипотезы:

- 1) вспышка является причиной СМЕ (см., например, [103]);
- 2) вспышка является следствием СМЕ [104];
- 3) вспышка и СМЕ имеют общую причину [105].

Для выбора одной из трех гипотез полезно выяснить, что происходит раньше – вспышка или ассоциированный с ней СМЕ. Данные, приведенные в литературе на этот счет, разнятся. Согласно [105], начало СМЕ обычно опережает на несколько минут начало рентгеновской вспышки. Однако по данным [101], 67% ассоциированных со вспышками СМЕ происходят после своих вспышек. В работе [106] исследовано 578 событий класса «вспышка, ассоциированная с СМЕ» (вспышка считалась ассоциированной с СМЕ, если произошла в пределах 100 минут до или после него), у которых разность момента регистрации СМЕ на LASCO и момента вспышки составляла не менее 5 минут. Получено, что распределение этой разности нормальное со средним 0, причем для 80% событий эта разность по модулю не превышает 30 мин. При этом выбросы, происходящие после вспышек, имеют отрицательное ускорение и высокую корреляцию между энергией СМЕ и пиковым потоком рентгеновского излучения вспышки (коэффициент корреляции 0.8). Выбросы, происходящие до вспышек, имеют положительное ускорение и почти не имеют корреляции между энергией СМЕ и пиковым потоком рентгеновского излучения вспышки

(коэффициент корреляции 0.1). В целом, природа связи вспышек и СМЕ требует дальнейшего исследования. Исследуется также вопрос о возможной взаимосвязи СМЕ с крупномасштабными событиями, такими как изменение корональных дыр и глобальной структуры межпланетного магнитного поля [107].

СМЕ могут иметь сильное и упорядоченное магнитное поле величиной в десятки нТл. Область такого поля называется магнитным облаком. Если направление поля облака противоположно направлению B_z -компоненты магнитного поля Земли (которая направлена от Земли почти перпендикулярно плоскости эклиптики), происходит геомагнитное возмущение. Магнитные бури могут быть связаны и с СМЕ, не содержащими магнитных облаков (магнитное поле таких СМЕ не упорядоченное, а флуктуирующее, и в целом слабее, чем в магнитных облаках). Если скорость СМЕ превышает локальную скорость звука, перед фронтом выброса образуется ударная волна. Геомагнитное возмущение может быть связано также и с ней. Геоэффективные ударные волны могут быть и не связаны с СМЕ, а быть следствием взрывных процессов на Солнце. Кроме того, магнитные бури вызываются коротирующими областями взаимодействия (co-rotating interaction regions, CIRs). Это области, где поток быстрого солнечного ветра догоняет поток медленного. В результате возникает уплотнение (концентрация более 10 см^{-3}) и флуктуирующее магнитное поле величиной до 10 нТл. В минимуме активности эти области живут до нескольких оборотов Солнца, в максимуме – менее одного оборота. Слабые геомагнитные возмущения могут быть вызваны и медленным солнечным ветром.

Индикатором геомагнитных возмущений служит геомагнитный индекс K_p . По значению индекса K_p магнитные бури распределены на 5 классов, от слабейших (G1, $K_p = 5$) до сильнейших (G5, $K_p = 9$). Используется также геомагнитный индекс Dst. Согласно [108], в 1976-2000 гг. произошло 464 магнитные бури класса $Dst \leq -50 \text{ нТл}$, источник которых удалось идентифицировать. Из них 31% было вызвано CIR, 18% – ударными волнами без выбросов, а все остальные – различными типами СМЕ. Среди более сильных

бурь доля вызванных СМЕ выше. По данным [109], в 1996-2005 гг. произошло 88 бурь класса $Dst \leq -100$ nT, из которых 60% было вызвано одиночными СМЕ, 27% множественными взаимодействующими СМЕ и 13% CIR. По [110], в 1964-2011 гг. с СМЕ были связаны все сильнейшие (класса G5) магнитные бури, почти все бури класса G4 (от 92% в минимуме до 100% в максимуме солнечной активности) и большая часть бурь класса G3 (от 58% в минимуме до 94% в максимуме солнечной активности). Эти данные показывают, что детектирование СМЕ является достаточно надежным средством предсказания сильных магнитных бурь.

Влияние, которое выбросы корональной массы, пришедшие в район Земли, оказывают на технические системы, делает актуальной проблему предсказания момента прибытия с точностью до нескольких часов. Эта проблема к настоящему времени не решена. Существует несколько эмпирических моделей для такого предсказания [111 – 114], опирающихся на те или иные предположения о кинематике СМЕ, но требуемой точности они не достигают.

Более полную информацию об истории и современном состоянии исследований солнечного ветра можно найти в монографиях [115 – 116]. Исследования СМЕ освещены также в обзорах [117 – 118].

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В физике солнечного ветра на сегодняшний день остается целый ряд нерешенных вопросов. Нет теоретической модели, описывающей его бимодальную структуру и ее эволюцию в цикле солнечной активности, природу турбулентности солнечного ветра, динамику выбросов корональной массы и т.д. С другой стороны, экспериментальных данных часто не достаточно, чтобы сделать выбор между несколькими существующими моделями. Не построена

полная картина токов и магнитных полей в гелиосфере. Неизвестно, наблюдается ли звездный ветер у всех звезд солнечного класса, или может наблюдаться аккреция. В этих условиях актуально изучение солнечного ветра и происходящих в нем процессов всеми имеющимися средствами. Наблюдения мерцаний радиоисточников на межпланетной плазме занимают важное место в ряду других методов исследования. В частности, они позволяют обнаруживать выбросы корональной массы на расстояниях от Солнца, недоступных для наблюдения с помощью коронографов, и исследовать структуру солнечного ветра сразу во многих направлениях, что недоступно при локальных измерениях. Кроме того, наблюдения мерцаний позволяют получать информацию об угловых размерах радиоисточников. В метровом диапазоне волн для многих источников такая информация отсутствует. Таким образом, рассматриваемая в диссертации проблема является актуальной.

Цели и задачи исследования

Основной целью является исследование радиоисточников и крупномасштабной структуры солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний вблизи минимума и в фазе роста 23/24 цикла солнечной активности.

Научная новизна

Для периода вблизи минимума солнечной активности обнаружено ослабление радиальных зависимостей индексов мерцаний для статистического ансамбля из нескольких сотен слабых мерцающих радиоисточников. Это ослабление интерпретировано как влияние гелиосферного токового слоя. Впервые применен метод оценки углового размера мерцающего компонента космического радиоисточника, основанный на измерениях частоты излома в дифракционной части спектра мощности насыщенных мерцаний. Такая оценка,

проведенная для источника В0531+194, хорошо согласуется с данными, полученными на других частотах. Рассмотрена корреляция всплесков рентгеновского излучения Солнца, всплесков мерцаний космических радиоисточников на межпланетной плазме и возмущений геомагнитного поля в годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. Показано, что, если за вспышкой на Солнце следует возмущение магнитного поля Земли, то в подавляющем большинстве случаев наблюдаются заметные повышения уровня мерцаний. Это означает, что метод мерцаний позволяет отследить большую часть крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме. Оценены скорости возмущений. Показано, что полученные оценки в большинстве случаев близки к средней скорости возмущения между Солнцем и Землей.

Методология и методы

В работе использованы современные радиоастрономические методы. Применялись известные методы обработки данных, математической статистики и т.д. Основная доля расчетов выполнялась автоматически компьютерными программами, написанными специально для этого. Дополнительный контроль качества наблюдений осуществлялся визуально по построенным графикам зависимости принятой плотности потока от времени. Полученные результаты анализировались с учетом самых свежих публикаций других авторов.

Достоверность результатов

Научные положения и выводы диссертационной работы обоснованы, достоверны и получили признание в научной литературе и на различных конференциях.

Практическая значимость работы

Исследование крупномасштабной структуры межпланетной плазмы и возмущений в ней имеет практическую значимость, так как позволяет фиксировать крупномасштабные возмущения вспышечного происхождения до их прихода к Земле. Как правило, возмущения в межпланетной плазме связаны с выбросами корональной массы (СМЕ – coronal mass ejection). Приход СМЕ в район Земли может иметь ряд нежелательных последствий. Так, возможно ухудшение (вплоть до полного прекращения) радиосвязи на некоторых частотах вследствие ионосферных бурь и повреждение, вплоть до выхода из строя, аппаратуры на космических аппаратах. Взаимодействие СМЕ с магнитным полем Земли вызывает магнитные бури. В свою очередь, магнитная буря способна породить наведенные токи в протяженных трубопроводах и линиях электропередач. Наведенные токи могут стать причиной серьезных технических проблем, вплоть до выхода из строя контрольно-измерительной аппаратуры трубопроводов и отключения трансформаторов электросетей вследствие перегрузок. Отдельно стоит отметить, что СМЕ представляют радиационную опасность для экипажей пилотируемых космических кораблей.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных сокращений, списка литературы и списка иллюстративного материала. Работа содержит 106 страниц машинописного текста, 18 рисунков, 2 таблицы, библиографию из 172 наименований на 16 страницах.

Во **Введении** кратко рассмотрена история исследований солнечного ветра и основные результаты, полученные к настоящему времени. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, отражены примененные методы, показана научная новизна и практическая

значимость, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, приведен список публикаций диссертанта, отражен его личный вклад и апробация полученных результатов.

В **Главе 1** описывается радиотелескоп БСА ФИАН, на котором выполнены наблюдения, методика обработки данных и основы метода мерцаний.

Глава 2 посвящена наблюдениям мерцаний статистического ансамбля радиоисточников в 2007-2011 гг. Показывается ослабление радиальной зависимости уровня мерцаний в минимуме 23/24 цикла солнечной активности. Это ослабление интерпретируется как влияние гелиосферного токового слоя.

В **Главе 3** излагается впервые применяемый метод оценки углового размера мерцающего радиоисточника по наблюдениям насыщенных мерцаний. Приводятся результаты оценки углового размера источника В0531+194 и показывается, что она хорошо согласуется с данными интерферометрических наблюдений на высоких частотах. Обсуждаются достоинства и недостатки примененного метода в сравнении с другими методами оценки углового размера источника по наблюдениям мерцаний.

Глава 4 посвящена детектированию выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний в 2011-2012 гг. Данные о всплесках мерцаний сопоставлены с данными о геомагнитных возмущениях и рентгеновских вспышках на Солнце. Показано, что наблюдения мерцаний позволяют регистрировать подавляющую часть распространяющихся возмущений, связанных со вспышками класса М5.0 и выше.

В **Главе 5** приведены оценки скорости возмущений, с которыми связаны одновременно и рентгеновская вспышка, и всплеск мерцаний, и геомагнитное возмущение. Показано, что в большинстве случаев оценки, основанные на наблюдениях мерцаний, хорошо согласуются со средней скоростью возмущения между Землей и Солнцем.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертации и указаны перспективы дальнейшего развития исследований, отраженных в диссертации.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Для периода вблизи минимума солнечной активности обнаружено ослабление радиальной зависимости уровня мерцаний статистического ансамбля из нескольких сотен слабых мерцающих радиоисточников. Это ослабление интерпретировано как влияние гелиосферного токового слоя.
2. Впервые применен метод оценки углового размера мерцающего компонента космического радиоисточника, основанный на измерениях частоты излома в дифракционной части спектра мощности насыщенных мерцаний. Такая оценка, проведенная для источника B0531+194, хорошо согласуется с данными, полученными на других частотах.
3. Рассмотрена корреляция всплесков рентгеновского излучения Солнца, всплесков мерцаний космических радиоисточников на межпланетной плазме и возмущений геомагнитного поля в годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. Показано, что, если за вспышкой на Солнце следует возмущение магнитного поля Земли, то в 75% случаев после вспышки, но до геомагнитного возмущения, наблюдается повышение уровня мерцаний в 1.5 раза и выше. Это означает, что метод мерцаний позволяет отследить большую часть крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме.
4. Оценены скорости обнаруженных возмущений, достигших Земли. В двух третях случаев оценка скорости, полученная по наблюдениям мерцаний, отличается от средней скорости возмущения между Солнцем и Землей не более чем на 16%. Это показывает, что наблюдения мерцаний позволяют оценивать скорость возмущений и время их прихода к Земле.

Личный вклад диссертанта

Во всех результатах, выносимых на защиту, вклад соискателя является определяющим. Соискатель совместно с соавторами участвовал в постановке задач и формулировке выводов работы. Выделение вклада мерцающих источников из предварительно обработанного сигнала, оценка индекса мерцаний, детектирование всплесков мерцаний, оценка скоростей выбросов корональной массы и т.д. выполнены компьютерными программами, написанными на языке C# лично соискателем. Визуальный контроль качества наблюдений осуществлен лично соискателем. Метод оценки углового размера источника по наблюдениям насыщенных мерцаний предложен соискателем совместно с научным руководителем, расчеты по оценке этим методом углового размера источника B0531+194 проведены лично соискателем.

Постановка задач, формулировка выводов и подготовка полученных результатов к публикации проводилась соискателем совместно с соавторами.

Все рисунки выполнены лично соискателем.

Данные о всплесках мерцаний, приведенные в таблицах 1, 2 и на рисунке 14, а также использованные для оценок скоростей CME, приведенных в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, получены лично соискателем. Данные о вспышках на Солнце, приведенные в таблицах 1, 2 и на рисунке 14, а также использованные для оценок скоростей CME, приведенных в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, заимствованы из источника [142]. Данные о геомагнитной активности, приведенные в таблицах 1, 2 и на рисунке 14, а также использованные для оценок скоростей CME, приведенных в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, заимствованы из источника [141]. Оценки скоростей CME по этим данным, приведенные в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, получены лично соискателем. Рисунки 1 – 11, 13 и 16 выполнены по данным, полученным лично соискателем. Рисунок 12 выполнен по данным по данным базы данных NED [150] и неопубликованным наблюдениям VLA [143]. Рисунок 15 представляет собой

элементарную геометрическую схему, иллюстрирующую взаимное расположение Земли, Солнца и радиоисточника, и не имеет научной новизны.

Список публикаций диссертанта

Изложенные в диссертации результаты опубликованы в 17 работах. Работы 1 – 7 нижеследующего списка опубликованы в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ. Работы 8 – 17 опубликованы в материалах конференций.

1. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51. – С. 1 – 6.

2. Чашей И. В., Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Глянцев А. В., Субаев И. А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности // Космические исследования. – 2013. – Т. 51. С. 28 – 34.

3. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. О возможности определения угловых размеров источников по наблюдениям межпланетных мерцаний в режиме насыщения. // Астрономический журнал. – 2013. – Т. 90. – С. 557 – 564.

4. Бутенко А. В., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. Кандидаты в гигантские радиогалактики на склонениях от 3.5° до 12° . // Астрономический журнал. – 2013. – Т. 90. – С. 3 – 9.

5. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. О детектировании выбросов корональной массы в межпланетной среде по наблюдениям мерцаний радиоисточников. // Астрономический журнал. – 2014. – Т. 91. – С. 713 – 719.

6. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Наблюдения выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2015. – Т. 92. – С. 46 – 52.

7. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2015. – Т. 92. – С. 38 – 45.

8. Бутенко А. В., Глянцев А. В. Калибровка наблюдений в обзоре источников на антенне БСА // VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 2010. – С. 17.

9. Бутенко А. В., Глянцев А. В. Поиск кандидатов в гигантские радиогалактики // XVI Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых, Волгоград, 2010. – С. 376.

10. Tyul'bashev S. A., Glyantsev A. V., Butenko A. V. The search of giant radio galaxies at declinations from 3 to 12 degrees // The XI Russian-Finish Radio Astronomy Symposium «Multi-Wavelength Investigation of Solar and Stellar Activity, and the Properties of Active Galactic Nuclei», Pushchino, 2010. – P. 30.

11. Glyantsev A. The interplanetary scintillation of the power scintillation sources in the decreasing phase near the minimum of solar activity cycle 23 // The 41st Young European Radio Astronomers Conference, Manchester, 2011. – P. 3.

12. Glubokova S., Glyantsev A. V., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V., Shishov V. I. Results of interplanetary scintillation observations of strong radio sources in the decline and minimum phases of cycle 23 of solar activity // 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, 2012. – P. 60.

13. Glyantsev A. The refractive and diffractive scintillation of the source B0531+194 // The 42nd Young European Radio Astronomers Conference, Pushchino, 2012. – P. 7.

14. Тюльбашев С. А., Глянцев А. В., Чашей И. В., Шишов В. И., Орешко В. В. Наблюдения мерцающих источников на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН. // Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В. Е. Степанова, Иркутск, 2013. – С. 256.

15. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. Программа обработки наблюдательных данных модернизированного телескопа БСА ФИАН. // Всероссийская радиоастрономическая конференция (ВРК-2014) «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии», Пушино, 2014. – С. 121.

16. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 на радиотелескопе БСА ФИАН. // V Пулковская молодежная астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 2014. – С. 19.

17. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Детектирование и оценка скоростей выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний радиоисточников. // V Пулковская молодежная астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 2014. – С. 20.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1. II Пулковская молодежная астрономическая конференция (Санкт-Петербург, 2009).

2. VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, 2010).

3. XVI Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых (Волгоград, 2010).

4. The XI Russian-Finish Radio Astronomy Symposium «Multi-Wavelength Investigation of Solar and Stellar Activity, and the Properties of Active Galactic Nuclei» (Pushchino, 2010).
5. Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2011).
6. The 41ht Young European Radio Astronomers Conference (Manchester, 2011).
7. XVIII Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых (Красноярск, 2012).
8. 19ht Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 2012).
9. The 42ht Young European Radio Astronomers Conference (Pushchino, 2012).
10. Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В. Е. Степанова (Иркутск, 2013).
11. The 43ht Young European Radio Astronomers Conference (Bielefeld, 2013).
12. 5 Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» (Москва, 2013).
13. V Пулковская молодежная астрономическая конференция (Санкт-Петербург, 2014).
14. The 43ht Young European Radio Astronomers Conference (Torun, 2014).
15. Всероссийская радиоастрономическая конференция (ВРК-2014) «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (Пушино, 2014).

Благодарности

Диссертант выражает благодарность сотрудникам ПРАО АКЦ ФИАН: Чашею И. В. – за руководство и помощь, Тюльбашеву С. А. – за помощь и поддержку на всех этапах работы, Глубоковой С. К. – за плодотворное сотрудничество, Шишову В. И. и Дагкесаманскому Р. Д – за полезные замечания.

Глава 1. Основы метода мерцаний, радиотелескоп БСА ФИАН и алгоритмы обработки данных

С 2006 г. в Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН на радиотелескопе БСА ФИАН ведутся круглосуточные наблюдения межпланетных мерцаний космических радиоисточников. За эти годы накоплен обширный наблюдательный материал, который может быть использован для решения широкого круга задач. Все наблюдения, использованные в настоящей работе, проведены на БСА ФИАН. В этой главе кратко обсуждаются основы метода межпланетных мерцаний, характеристики радиотелескопа БСА ФИАН и алгоритмы первичной обработки данных.

1.1. Основы метода межпланетных мерцаний

Межпланетные мерцания (IPS – interplanetary scintillations) были обнаружены в 1964 г. [19]. Радиоволны, приходящие от удаленного компактного радиоисточника, испытывают рефракцию и дифракцию на неоднородностях плотности межпланетной плазмы. В результате фронт плоской радиоволны, прошедшей через межпланетную плазму, приобретает в разных точках различный набег фазы. Поэтому интенсивность, наблюдаемая в дальней зоне в данный фиксированный момент времени, зависит от местоположения наблюдателя. При движении солнечного ветра относительно Земли радиотелескоп попадает поочередно в минимумы и максимумы распределения интенсивности, что наблюдается как флуктуации принимаемой интенсивности с временным масштабом ~ 1 с. Пример записи источника с межпланетными мерцаниями приведен на рисунке 1.

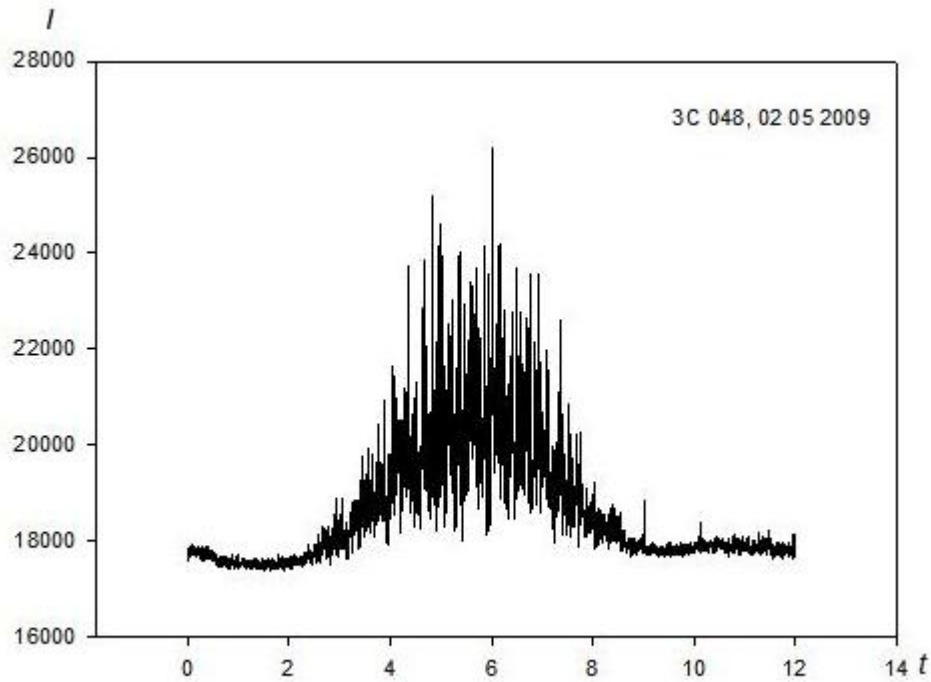


Рисунок 1. Запись мерцающего источника 3C048 на радиотелескопе БСА ФИАН 2 мая 2009 г. По горизонтальной оси отложено время в минутах, по вертикальной – плотность потока в относительных единицах. Результаты диссертанта из работы [124].

Мерцания происходят на неоднородностях концентрации плазмы с масштабами порядка френелевского, определяемого как

$$a_{\phi} = \sqrt{\frac{z}{k}},$$

где z – расстояние от наблюдателя до эффективно модулирующего слоя, k – волновое число [20].

Уровень мерцаний источника на межпланетной плазме определяется дисперсией концентрации плазмы. Обычно предполагается, что для невозмущенной плазмы дисперсия концентрации прямо пропорциональна ее среднему значению. Известно, что плотность межпланетной плазмы в области сформировавшегося течения уменьшается с увеличением расстояния от Солнца

как $1/R^2$, где R – расстояние до Солнца [48]. Тогда дисперсия концентрации плазмы вдоль луча зрения будет меняться как

$$\sigma_n^2 \propto \frac{1}{(z^2 + 2a.e.z \cos \varepsilon + 1a.e.)^2},$$

где ε – элонгация источника (угловое расстояние между источником и Солнцем), координата z отсчитывается от наблюдателя вдоль луча зрения. Ближайшая к Солнцу точка луча зрения называется прицельной точкой. Ее координата равна $z_0 = 1a.e. \cos \varepsilon$. В этой точке достигается максимальная концентрация плазмы на луче зрения. При малых элонгациях ($\varepsilon < 50^\circ$) основной вклад в межпланетные мерцания дает относительно тонкий слой вблизи прицельной точки. Поэтому

френелевский масштаб будет равен

$$a_\phi = \sqrt{\frac{z_0}{k}},$$

и для метровых волн составит несколько сотен километров.

Ввиду тонкости слоя можно пренебречь изменениями амплитуды излучения и считать, что меняется только его фаза. В этом состоит приближение фазового экрана [119 – 120]. Современная теория распространения волн в случайно неоднородных средах изложена в работах [121 – 123].

Зависимость набега фазы радиоволны от координат описывается как эргодическая стационарная случайная функция. Структурная функция набега фазы, по определению, имеет вид

$$D(\vec{\rho}) = \langle [\Delta\Phi(\vec{r} + \vec{\rho}) - \Delta\Phi(\vec{r})]^2 \rangle,$$

где $\Delta\Phi$ – набег фазы, \vec{r} – радиус-вектор точки и $\vec{\rho}$ – аргумент структурной функции.

В случае степенного спектра турбулентности от значения структурной функции $D(\vec{\rho})$ на френелевском масштабе зависит относительный вклад рефракции и дифракции в мерцания. Режим $D(a_\phi) \ll 1$ называется режимом слабых мерцаний. В этом режиме мерцания вызываются дифракцией, причем основной вклад вносит дифракция на неоднородностях масштаба порядка френелевского.

Режим $D(a_\phi) \gg 1$ называется режимом насыщенных мерцаний. В этом режиме мерцания являются суперпозицией двух процессов: дифракции на неоднородностях масштаба $b_{\text{диф}}$ (этот масштаб определяется уравнением $D(b_{\text{диф}}) = 1$) и рефракции на неоднородностях масштаба $b_{\text{реф}}$ (этот масштаб определяется уравнением $b_{\text{реф}} = z_0 \Theta$, где Θ – угол рассеяния [34]). В свою очередь, угол рассеяния связан с дифракционным масштабом насыщенных мерцаний уравнением $\Theta = 1/(k b_{\text{диф}})$, откуда имеем простую связь между дифракционным и рефракционным масштабами: $b_{\text{диф}} b_{\text{реф}} = a_\phi^2$ [34]. С приближением к Солнцу угол рассеяния возрастает, и соответственно дифракционный масштаб $b_{\text{диф}}$ уменьшается, а рефракционный масштаб $b_{\text{реф}}$ увеличивается.

Флуктуации принятой интенсивности со временем описываются автокорреляционной функцией

$$B_I(\tau) = \langle [I(t + \tau) - I(t)]^2 \rangle.$$

Спектр мощности мерцаний $P(f)$ есть Фурье-образ $B_I(\tau)$. Типичный вид спектра мощности в режиме слабых мерцаний приведен на рисунке 2.

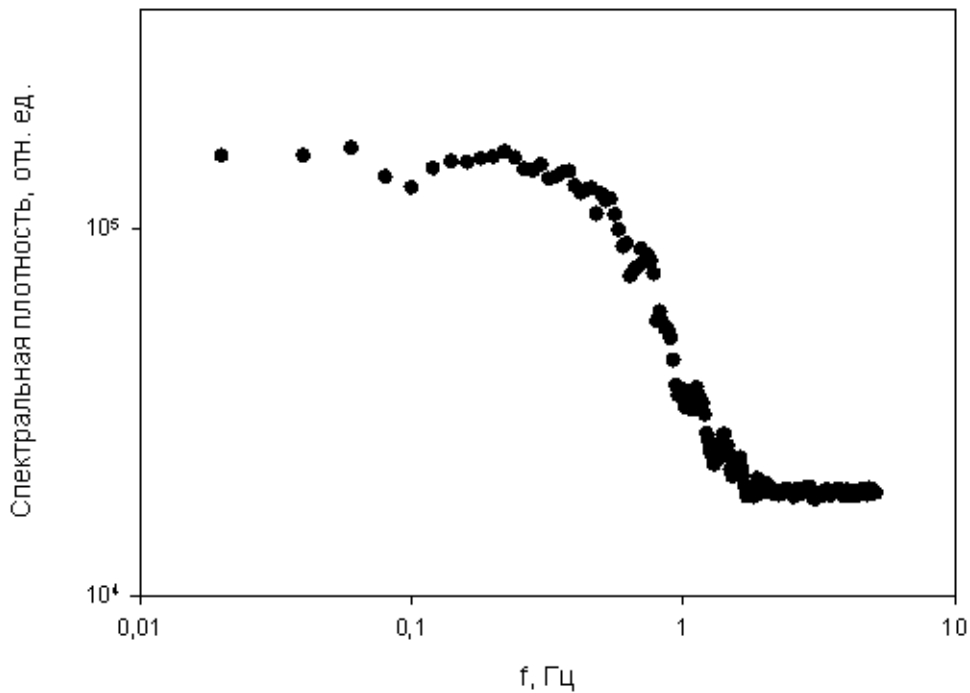


Рисунок 2. Спектр мощности мерцаний источника 3C048 на 2 мая 2009 г. По горизонтальной оси отложена частота в герцах, по вертикальной – спектральная плотность мощности в относительных единицах. Масштаб по обеим осям логарифмический. Результаты диссертанта из работы [124].

В общем случае спектр мощности мерцаний зависит от пространственного спектра турбулентности межпланетной плазмы, скорости солнечного ветра, распределения параметров солнечного ветра по лучу зрения и распределения радиояркости источника [34]. Пространственный спектр турбулентности по результатам измерений имеет степенной вид $\Phi_{N_e} \propto \vec{q}^{-n}$ [20]. Распределение радиояркости источника обычно принимают гауссовым. Распределение параметров солнечного ветра по лучу зрения можно найти, исходя из той или иной модели глобальной структуры солнечного ветра (например, солнечный ветер можно полагать сферически симметричным). Таким образом, при некоторых обоснованных предположениях спектр мощности источника оказывается зависящим от трех параметров – показателя спектра турбулентности n , скорости солнечного ветра v , стандартного отклонения распределения радиояркости θ_0 . Если два из этих параметров известны, можно найти третий.

На этом основаны методы оценки скорости солнечного ветра и спектра турбулентности плазмы по наблюдениям сильных компактных источников [36, 37, 43, 124]. Подробнее вопрос о спектрах насыщенных и слабых мерцаний будет рассмотрен в главе 3.

В качестве характеристики мерцаний традиционно используется индекс мерцаний

$$m^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (1.1)$$

Легко видеть, что он представляет собой среднеквадратичное отклонение сигнала, нормированное на его среднюю величину. Поэтому индекс мерцаний равен $B_I(0)/\langle I \rangle$ и связан со спектром мощности соотношением

$$m^2 = \frac{1}{\langle I \rangle^2} \int_0^{f_n} P(f) df. \quad (1.2)$$

Здесь f_n - характерная частота шумов.

Для точечного источника в режиме насыщенных мерцаний $m^2 \approx 1$, в режиме слабых мерцаний – $m^2 \ll 1$. Для источника ненулевого углового размера даже в режиме насыщенных мерцаний $m^2 \ll 1$.

В отсутствие крупномасштабных возмущений в солнечном ветре распределение плотности и уровня турбулентности плазмы вдоль луча зрения определяется элонгацией источника. Поэтому существует зависимость $m = m(\varepsilon)$, которая параметрически зависит от углового размера источника и может быть использована для его оценки. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в главе 3.

Индекс мерцаний может быть с удовлетворительной точностью оценен лишь для достаточно сильных источников, у которых флуктуации сигнала, вызванные мерцаниями, существенно превосходят шумы радиотелескопа. Понятно, что это накладывает ограничения на количество наблюдаемых источников и тем самым – на плотность их на небесной сфере. В связи с этим предложено измерять флуктуации плотности потока статистического ансамбля мерцающих радиоисточников, что позволяет использовать слабые, предельно

обнаружимые источники с плотностью потока до десятых долей Ян [125]. Для слабых мерцающих источников можно оценить лишь основные параметры мерцаний – средний индекс мерцаний по ансамблю источников и количество мерцающих источников, наблюдаемых за фиксированный промежуток времени. Эти данные позволяют исследовать крупномасштабную структуру солнечного ветра [126]. Ожидается, что они также позволят детектировать крупномасштабные возмущения.

1.2. Радиотелескоп БСА ФИАН

Радиотелескоп БСА (Большая Синфазная Антенна) вступил в строй в 1974 г. Он представляет собой двумерную антенную решетку, фазуемую по одной координате, размерами 187×364 метра в направлениях «восток-запад» и «север-юг», соответственно. Антенна состоит из 256 рядов, в каждом из которых по 64 диполя [127]. БСА является самым высокочувствительным радиотелескопом в мире в метровом диапазоне волн.

БСА имеет две независимые диаграммы направленности. Каждая из них сориентирована на небесный меридиан (за учетом некоторой хорошо известной поправки [128]) и неподвижна относительно поверхности Земли. Сканирование небесной сферы производится за счет ее суточного вращения. Первая диаграмма направленности имеет шестнадцать лучей, разнесенных по склонению. В общей сложности лучи перекрывают на небесной сфере полосу $\sim 8^\circ$ по склонению и, в течение суток, $\sim 24^h$ по прямому восхождению. Существует возможность одновременного изменения склонений всех лучей данной диаграммы направленности на $\sim 15'$. Размер луча в направлении на зенит составляет, по уровню половинной мощности, $\sim 0.5^\circ \times 1^\circ$ [129].

Первоначально радиотелескоп БСА работал на частоте 102.5 МГц, однако в связи с появлением радиовещания в FM-диапазоне был перестроен на частоту 111 МГц. После перестройки эффективная площадь антенны упала с 25000-30000 м² до 10000-15000 м² [128]. Выделенные в последние годы средства позволили

полностью модернизировать антенну (замена изоляторов диполей, сходов, усилителей первого и второго этажей, новые диаграммообразующие матрицы Батлера, новые приемники), что вывело радиотелескоп на качественно новый уровень работы [130]. На настоящий момент эффективная площадь антенны в направлении на зенит составляет 45000-50000 м², ширина полосы приема 2.4 МГц (вместо 600 кГц), новая (вторая) диаграмма направленности имеет 96 лучей, перекрывающих область склонений от -8° до 42° [131], ведутся работы по увеличению количества лучей до 128. Построено два цифровых приемника по 48 каналов. Флуктуационная чувствительность антенны не хуже 0.1-0.15 Ян при постоянной времени 0.1 с. Заметим, что медианная оценка уровня путаницы мерцающих радиоисточников на БСА – 0.14 Ян [132]. Цифровые приемники позволяют также использовать постоянную времени 0.001 с. Каждый канал цифрового приемника разделен на шесть частотных полос, запись в которых осуществляется независимо.

С 2006 по 2011 гг. первая диаграмма направленности БСА работала в режиме круглосуточного мониторинга. В связи с основной его задачей – наблюдением мерцающих источников – в течение года наблюдались две различные площадки на небесной сфере: с марта по октябрь – со склонениями от $\sim 3.5^\circ$ до $\sim 12.5^\circ$ и с октября по март – со склонениями от $\sim 28.5^\circ$ до $\sim 35^\circ$ [124]. Выбор площадок связан с годичным изменением склонения Солнца, от которого зависят оптимальные для наблюдения мерцаний элонгации радиоисточников. С июля 2011 г. в режиме круглосуточного мониторинга работает вторая диаграмма направленности БСА. В настоящей работе использованы наблюдения, выполненные в 2006-2009 гг. на первой диаграмме направленности БСА и с июля 2011 по июнь 2012 гг. на шестнадцати лучах третьей диаграммы направленности, перекрывающих склонения от 17.5° до 25° [133].

В наблюдениях, использованных в данной работе, применялся 16-канальный аналоговый приемник, каждый канал которого был подключен к одному лучу диаграммы направленности, с полосой пропускания 600 кГц и постоянной времени 0.1 с.

1.3. Распознавание вклада мерцающих источников в сигнале, принятом радиотелескопом

Сигнал, принятый радиотелескопом БСА, состоит из следующих компонентов.

1) Галактический фон с характерным временем изменения $\sim 1^h$.

2) Сигнал от протяженных (немерцающих) компонентов радиоисточника. Для диаграммы направленности БСА практически все эти источники точечные, поэтому их временной масштаб определяется шириной диаграммы по прямому восхождению и составляет $425^s / \cos \delta$, где δ – склонение источника.

3) Ионосферные мерцания с характерным временем $\sim 10^s$.

4) Межпланетные мерцания с характерным временем $\sim 1^s$.

5) Шумы с характерным временем $\sim 0.1^s$.

6) Помехи. Временной масштаб помех может быть различным в зависимости от их природы. Чаще всего встречаются импульсные помехи с характерным временем $\sim 0.1^s$.

Разница в характерных временных масштабах компонентов сигнала использовалась для выделения вклада мерцающих источников. Методика, заимствованная из работ [125, 134], выглядит следующим образом:

1) Медианная фильтрация с шагом 1.5 с. Используется для устранения импульсных помех. Медианный фильтр эффективно устраняет сигналы, характерная продолжительность которых меньше шага фильтрации. Поэтому фильтр с шагом 1.5 с эффективно устраняет большинство импульсных помех и не искажает записей космических радиоисточников. Заметим также, что фильтр уменьшает дисперсию шумов, а также и дисперсию мерцаний. Однако, согласно работе [135], при этом практически не изменяется соотношение «сигнал – шум».

2) Разностная фильтрация с шагом 1 с. Разностная фильтрация массива $\{I(t_i)\}$ с шагом τ описывается формулой

$$I_{out}(\tau, t_i) = I(t_i + \tau) - I(t_i),$$

где $I(t_i)$ – i -тая точка сигнала до фильтрации, $I_{out}(\tau, t_i)$ – i -тая точка сигнала после фильтрации. Разностный фильтр значительно подавляет компоненты сигнала, характерный временной масштаб которых заметно превышает шаг фильтра. Таким образом, фильтрация с шагом 1 с подавляет вклад вариаций фонового сигнала, не мерцающих на межпланетной плазме компонентов космических радиоисточников, продолжительных помех и ионосферных мерцаний. Дисперсия межпланетных мерцаний и шумов при этом увеличивается.

3) Возведение в квадрат и усреднение по одной минуте. Возведение в квадрат делает все числа в прошедшем разностный фильтр массиве положительными. Усреднение по одной минуте сглаживает дисперсию мерцаний и шумов. Однако мерцания, в отличие от шумов – мультипликативный эффект, то есть дисперсия мерцаний при прочих равных условиях тем больше, чем больше плотность потока мерцающего компонента радиоисточника. Поэтому усреднение по одной минуте придает обработанному сигналу мерцающего радиоисточника форму, сходную с формой диаграммы направленности.

Полученный в результате сигнал $D(\tau = 1 \text{ c}, t)$, согласно работе [125], равен

$$D(\tau = 1 \text{ c}, t) = 2(\sigma_{IPS}^2 + \sigma_{noise}^2),$$

где σ_{IPS} и σ_{noise} – среднеквадратические отклонения межпланетных мерцаний и шумов, соответственно.

4) Медианная фильтрация с шагом в 1 мин. Она устраняет вредные сигналы с характерной продолжительностью, меньшей одной минуты. В их число входят зашкалы и вариации фонового сигнала, преобразованные разностной фильтрацией в короткие (не более шага разностной фильтрации, т. е. одной секунды) помехи, а затем усредненные внутри минутных интервалов.

5) Десятичное логарифмирование сигнала. Это вспомогательная операция, призванная облегчить визуальное восприятие данных. После логарифмирования график зависимости принятой плотности потока от времени автоматически строится в полулогарифмических координатах, в которых шкала времени – равномерная, а шкала плотностей потока – логарифмическая.

б) Диаграммная фильтрация с шагом в 3 мин., т. е. около половины характерного времени прохождения космического радиоисточника через диаграмму направленности. Диаграммный фильтр описывается формулой

$$\Delta = \frac{1}{2}[I(t - \tau) - 2I(t) + I(t + \tau)],$$

где Δ – результирующий сигнал, $I(t)$ – сигнал, подвергающийся фильтрации, τ – шаг диаграммной фильтрации (в данном случае составляющий 3 мин.). Диаграммная фильтрация подчеркивает вклад в сигнал космических радиоисточников. После пропускания сигнала через диаграммный фильтр на месте источников возникают характерные структуры, имеющие один положительный и два отрицательных лепестка. Величина Δ в максимуме положительного лепестка равна [125]

$$\Delta = \lg \left(1 + \frac{\sigma_{IPS}^2}{\sigma_{noise}^2} \right).$$

В работе [125] показано, что основной вклад в эту величину дают мерцающие источники с дисперсией мерцаний, сравнимой с дисперсией шумов, и что величина Δ пропорциональна количеству таких источников в интервале усреднения.

Отрицательные лепестки сдвинуты на ± 3 мин, их амплитуды вдвое меньше амплитуды центрального. Типичная ширина центрального лепестка составляет примерно 2 мин.

7) Усреднение записи по нескольким дням наблюдений. Значения, полученные в разные дни в одно и то же звездное время, усредняются между собой. Ясно, что космические радиоисточники (за исключением Солнца, которое не является объектом наблюдений) из-за отсутствия собственного движения по небесной сфере проходят через диаграмму направленности в один и тот же момент по звездному времени для каждых звездных суток. Таким образом, усреднение не должно изменить вклада в результирующий сигнал космических радиоисточников. В то же время посторонние сигналы (которые могут остаться в записи, несмотря на фильтрацию помех) имеет смысл считать приходящими в

независимые друг от друга моменты времени. Таким образом, их вклад должен уменьшиться в корень из n раз, где n – количество суток, по которому проводится усреднение.

Следует иметь в виду, что уровень межпланетных мерцаний радиоисточника зависит от элонгации, которая меняется ото дня ко дню с суточным движением Солнца. Оптимальны для наблюдения мерцаний элонгации $20^\circ - 70^\circ$, область элонгаций $> 90^\circ$ в метровом диапазоне для исследования солнечного ветра практически не используется. Вклад мерцающих источников будет обнаружен в тех областях наблюдаемой площадки, которые имели подходящие элонгации. Это следует учитывать и при выборе количества дней, по которому усредняется сигнал. Слишком большой интервал усреднения для любого источника содержит много дней с неоптимальными элонгациями, и вклад этих дней уменьшает мерцающий компонент сигнала в усредненной записи. Опыт показывает, что оптимальным для усреднения оказывается интервал продолжительностью около одного месяца.

Сигнал, прошедший все этапы обработки, показан на рисунке 3.

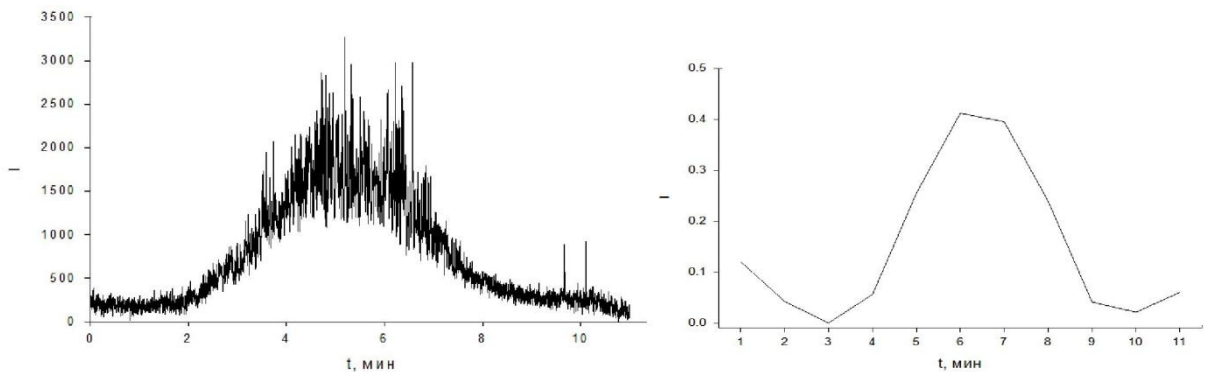


Рисунок 3. Пример исходной записи источника В0409+231 за 05.08.2011 и трехлепестковой записи, получившейся после обработки сигнала. По горизонтальной оси отложено время в минутах, вертикальной – плотность потока в относительных единицах. Результаты диссертанта из работы [133].

Благодаря эффективному устранению из обработанного сигнала всех компонентов, кроме вклада межпланетных мерцаний, вклад мерцающего

источника можно распознать просто по превышению обработанным сигналом некоторого порогового уровня. Непосредственная проверка по наблюдательным данным 2011-2012 гг., усредненным по месячным интервалам, показала, что пороговый уровень, обеспечивающий плотность обнаруженных источников в 7-10 источников на луч, не дает ложных обнаружений.

1.4. Оценка индекса мерцаний одиночного радиоисточника

Удобство применения индекса мерцаний заключается в том, что для его определения не требуется знать вклад мерцающего и немерцающего компонента источника в янских. Отношение единицы аналого-цифрового преобразователя телескопа к янскому, которое ежедневно меняется из-за погодных условий и других факторов, одинаково для мерцающего и немерцающего компонента источника, поэтому входит в качестве множителя и в числитель, и в знаменатель, и сокращается. Таким образом, для определения индекса мерцаний достаточно измерить плотность потока мерцающего и немерцающего компонента источника в единицах АЦП.

Индекс мерцаний вычислялся следующим образом:

1. Определяется момент кульминации источника (он соответствует максимуму в зависимости $I = I(t)$).
2. Вблизи момента кульминации на интервале в одну минуту вычисляется среднее значение сигнала I_c и среднеквадратичное отклонение σ .
3. Определяются нули источника (как точки, отстоящие от момента кульминации на половину длины источника, равной $425^s / \cos \delta$, где δ – склонение луча).
4. Вблизи нулей источника сигнал усредняется по полуминутным интервалам. В получившиеся точки вписывается прямая. Эта прямая принимается за нулевой уровень.

5. Определяется значение I_0 нулевого уровня в момент кульминации источника и вычисляется среднее значение сигнала в момент кульминации за вычетом нулевого уровня: $\langle I \rangle = I_c - I_0$.

6. Вычисляется индекс мерцаний по формуле $m = \sigma / \langle I \rangle$.

Т.к. обработанный сигнал усреднен по минуте, момент кульминации по нему можно узнать лишь с точностью до минуты. Кроме того, видимый момент кульминации источника иногда смещается относительно истинного из-за влияния ионосферы (типичное смещение около 20^s , максимальное наблюдавшееся – до 2^m). Поэтому перед определением нулей и вычислением среднего сигнала момент кульминации источника уточняется. Для уточнения используется свертка исходного (необработанного) сигнала с функцией $y = \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$, моделирующей диаграмму направленности телескопа. На интервале в ± 3 минуты от предполагаемого максимума источника ищется максимум свертки. Найденный максимум свертки принимается за максимум источника.

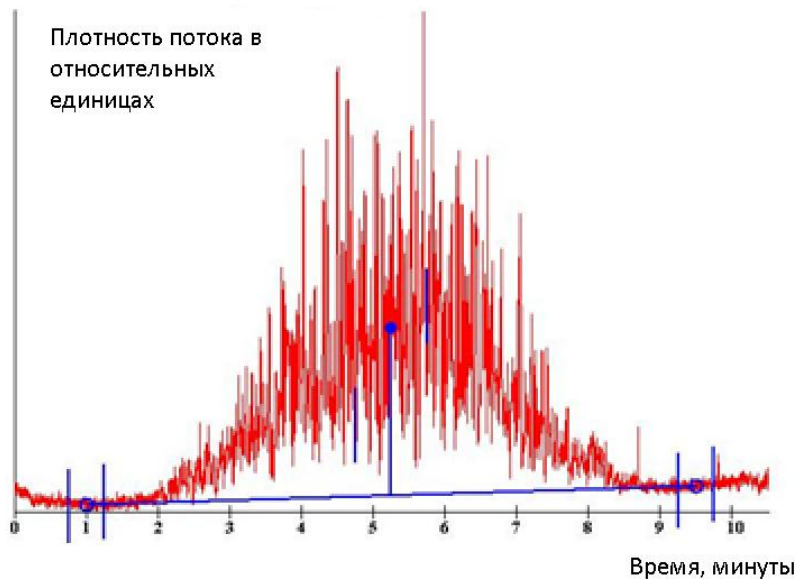


Рисунок 4. *Определение центра и нулей источника. Результаты диссертанта из работы [133].*

На частоте работы БСА источник подвержен не только межпланетным, но и ионосферным мерцаниям. Вышеописанный алгоритм вычисления m не

разделяет их. Поэтому применять его для оценки индекса межпланетных мерцаний можно, лишь предварительно убедившись, что ионосферные мерцания малы по сравнению с межпланетными.

В более общем случае для оценки индекса межпланетных мерцаний можно использовать спектр мощности. Интегрируя его по частотам, характерным только для межпланетных мерцаний, можно отделить их от ионосферных. Для вычисления спектра мощности используется фрагмент сигнала длиной около 3 мин. вблизи момента кульминации источника. Момент кульминации и среднее значение сигнала определяются так же, как и для оценки индекса мерцаний по формуле (1.1). Вычисление индекса мерцаний происходит следующим образом:

1. Вычисляется спектр в частотном интервале от 0 до 5 Гц.
2. В интервале от 2 до 5 Гц, заведомо содержащем лишь шумы, вычисляется средняя спектральная плотность. Она считается средней спектральной плотностью шума.
3. Определяется верхний предел интегрирования d как первая точка спектра, спектральная плотность в которой не превосходит средней спектральной плотности шума.
4. Интервал от 0 до 0.1 Гц считается подверженным влиянию ионосферы. Вычисляется средняя спектральная плотность P_s в интервале от 0.1 до 0.3 Гц и все точки спектра в интервале от 0 до 0.1 Гц заменяются значением P_s .
5. Спектр интегрируется от 0 до d методом прямоугольников.
6. Вычисляется индекс мерцаний согласно формуле (1.2).

Проведенная проверка показала, что в случае, когда ионосферные мерцания пренебрежимо малы, индексы мерцаний, вычисленные двумя рассмотренными методами, хорошо согласуются между собой.

1.5. Выводы по главе 1

Эффект межпланетных мерцаний заключается в рефракции и дифракции радиоволн на неоднородностях плазмы солнечного ветра. В результате имеют место флуктуации фазы и амплитуды принимаемых волн от одной точки пространства к другой. Движение солнечного ветра относительно наблюдателя приводит к тому, что амплитуда принимаемых наблюдателем радиоволн флуктуирует во времени. Мерцания описываются как эргодический стационарный случайный процесс. Наиболее распространенными их характеристиками является спектр мощности (Фурье-образ автокорреляционной функции принятой плотности потока) и индекс мерцаний (среднеквадратичное отклонение принятой плотности потока, нормированное на среднюю плотность потока источника).

В Пушинской радиоастрономической обсерватории наблюдения межпланетных мерцаний ведутся с момента их обнаружения, а с 2006 г. ведется круглосуточный мониторинг на радиотелескопе БСА ФИАН. БСА представляет собой плоскую двумерную эквидистантную фазирруемую по одной координате антенную решетку. На текущий момент БСА имеет три независимые многолучевые диаграммы направленности. Каждая из них неподвижна относительно поверхности Земли и ориентирована на небесный меридиан, так что сканирование неба производится за счет его суточного вращения. В настоящей работе использованы наблюдения, выполненные в 2007-2012 гг. с использованием аналогового приемника (частота 111 МГц, полоса приема 600 кГц, частота съема информации 10 Гц). В настоящее время имеются также цифровые приемники, имеющие 6 спектральных каналов суммарной шириной 2.4 МГц с центральной частотой 110.25 МГц. БСА является самым большим и чувствительным радиотелескопом в мире в метровом диапазоне длин волн.

Чтобы выделить вклад мерцающего источника из первичных наблюдательных данных, необходимо отделить его от помех, шумов, ионосферных мерцаний, вариаций фона и вклада немерцающих источников. Для

этого используется то обстоятельство, что межпланетные мерцания отличаются от других составляющих принятого сигнала своим характерным временным масштабом (~ 1 с). Ряд фильтров (медианный, разностный, диаграммный) позволяют выделить вклад мерцающего источника. В дальнейшем производится расчет спектра мощности и индекса мерцаний по известным формулам.

Глава 2. Межпланетные мерцания ансамбля слабых радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности

Традиционные характеристики мерцаний, такие как индекс мерцаний и спектр мощности, могут быть с удовлетворительной точностью вычислены лишь для достаточно сильных источников. Такие источники встречаются на небе достаточно редко. В то же время задача исследования структуры солнечного ветра и детектирования возмущений в нем требует как можно более плотной сети источников. Большая часть наблюдаемых источников являются слабыми, и для них параметры мерцаний оценить затруднительно. Кроме того, для большинства слабых источников неизвестны угловые размеры, от которых зависит уровень мерцаний источника.

Для преодоления этой трудности в работе [125] предложено оценивать не параметры мерцаний одиночных слабых источников, а средние параметры ансамбля источников, который предполагается статистически однородным. В этой главе представлены результаты наблюдений такого ансамбля в 2007-2011 гг. Эти результаты изложены в работе [126].

2.1. Методика и результаты наблюдений

Наблюдения проводились в 2007-2011 гг. на радиотелескопе БСА ФИАН с шестнадцатилучевой диаграммой направленности в следующей полосе склонений: с марта по октябрь – от $\sim 3.5^\circ$ до $\sim 12.5^\circ$ и с октября по март – от $\sim 28.5^\circ$ до $\sim 35^\circ$.

В качестве ансамбля радиоисточников естественно взять участок неба фиксированной площади. Была выбрана площадь 64 квадратных градуса. Согласно работе [125], типичное количество мерцающих источников в такой составляет несколько десятков.

В гл. 1 описана методика получения величины $\Delta = \lg(1 + \frac{\sigma_{IPS}^2}{\sigma_{noise}^2})$, где σ_{IPS}^2 – дисперсия межпланетных мерцаний, σ_{noise}^2 – дисперсия шумов. Величина Δ пропорциональна числу источников в интервале усреднения, имеющих дисперсию мерцаний, сравнимую с дисперсией шумов [125]. Эта величина довольно чувствительна к уровню шумов, поэтому характеризовать ею дисперсию мерцающего потока ансамбля слабых источников неудобно. В связи с этим была проведена дополнительная обработка. А именно, все значения $\Delta \geq 0.03$ внутри данной площадки были сложены между собой. Полученная сумма

$$\Psi = \sum_{\Delta \geq 0.03} \Delta$$

имеет смысл интегральной дисперсии мерцающего потока в данной площадке. Этот параметр пропорционален количеству источников и, следовательно, среднему по ансамблю индексу мерцаний, но не так чувствителен к уровню шумов, как Δ .

Напомним, что диаграмма направленности радиотелескопа БСА ФИАН неподвижна относительно поверхности Земли, и сканирование неба происходит за счет его суточного вращения. Наблюдения велись на 16-лучевой диаграмме направленности, так что в каждый момент времени обозревался участок неба в 8° по склонению и 7^m по прямому восхождению, то есть одна стандартная площадка $8^\circ \times 8^\circ$ сканировалась 32 минуты. За сутки, таким образом, просматривалось 45 стандартных площадок. Изменения Ψ от площадки к площадке могут быть связаны как с пространственным расположением площадок, так и с крупномасштабными возмущениями в плазме (например, СМЕ). Чтобы исключить влияние возмущений и выделить зависимость Ψ от расположения площадки, можно усреднить Ψ в одной и той же площадке за достаточно большой промежуток времени. На рисунке 5 приведена зависимость $\Psi = \Psi(t)$, где одна точка по оси времени равна 32 минуты, т.е. каждое значение

Ψ есть значение Ψ в одной площадке. Данные по каждой площадке усреднены за месяц (февраль 2007-2011 гг.).

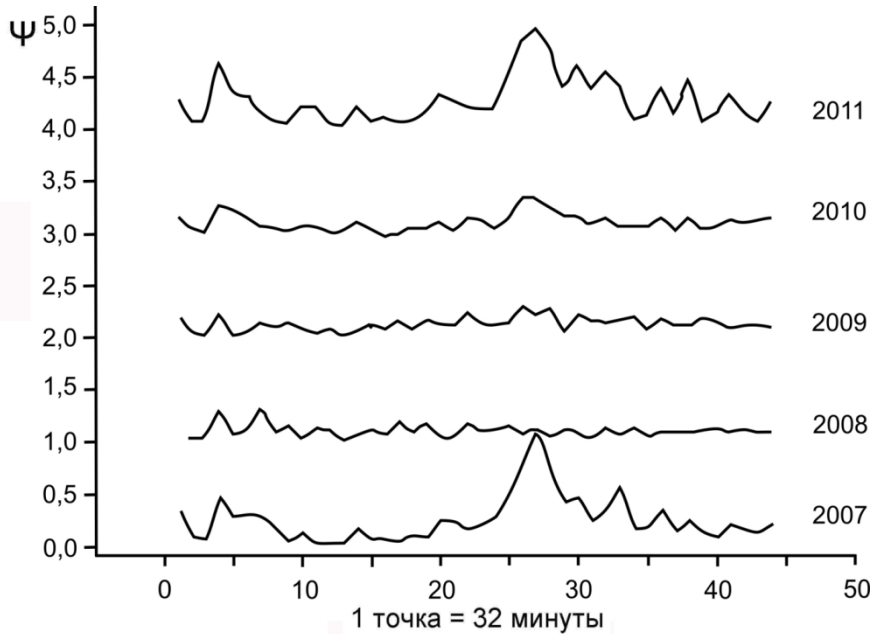


Рисунок 5. Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах в зависимости от времени суток. Минимальное расстояние площадки от Солнца в точке 28. Результаты диссертанта из работы [126].

В данных 2007 и 2011 гг. четко виден центральный максимум. Он соответствует площадке, максимально близкой к Солнцу (элонгация около 20°). При удалении от Солнца Ψ уменьшается. Это естественным образом объясняется тем, что при минимальных элонгациях луч зрения проходит через области с наибольшей концентрацией плазмы, а значит, ансамбль источников показывает максимальный уровень мерцаний.

Заметим, однако, что центральный максимум практически отсутствует в 2008 и 2009 гг. и незначителен в 2010 г.

На рисунке 6 приведены аналогичные данные для серий наблюдений в осенне-летние месяцы, границы интервалов усреднения обозначены возле соответствующих кривых. Динамика основного максимума, который расположен

в левой части рисунка, в целом сходна с изображенной на рисунке 5, но подавление зависимости в 2008–2009 гг. не столь сильное, как в зимние месяцы.

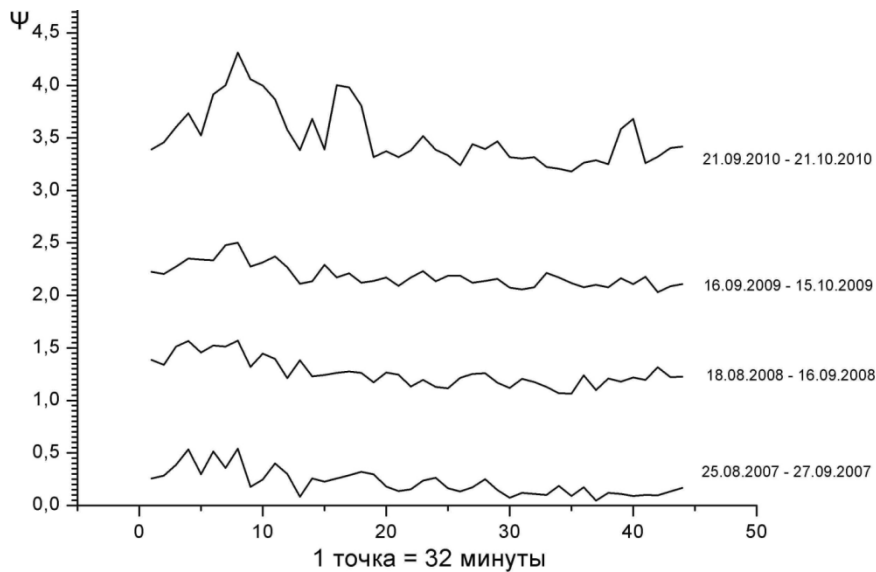


Рисунок 6. *Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах в зависимости от времени суток. Минимальное расстояние площадки от Солнца в точке 6 для двух нижних кривых и в точке 9 для двух верхних кривых. Результаты диссертанта из работы [126].*

В левой части кривых рисунка 5 и центральной части кривых 2008 и 2010 гг. рисунка 6 имеются указания на присутствие слабого вторичного максимума, положение которого соответствует антисолнечному

направлению луча зрения на наблюдаемую площадку. Отметим, что как плавные, так и резкие вариации данных, приведенных на рисунках 5, 6, по крайней мере на порядок превосходят статистическую погрешность и обусловлены вариациями плотности межпланетной плазмы.

Рисунок 7 иллюстрирует временную динамику среднего по всем площадкам значения Ψ , усредненного по интервалам длительностью один месяц. Эти значения пропорциональны среднему абсолютному уровню флуктуации плотности плазмы на масштабах порядка френелевского во всей просвечиваемой

области солнечного ветра. Разрыв в данных в летние месяцы 2010 г. связан с проведением технических работ на радиотелескопе.

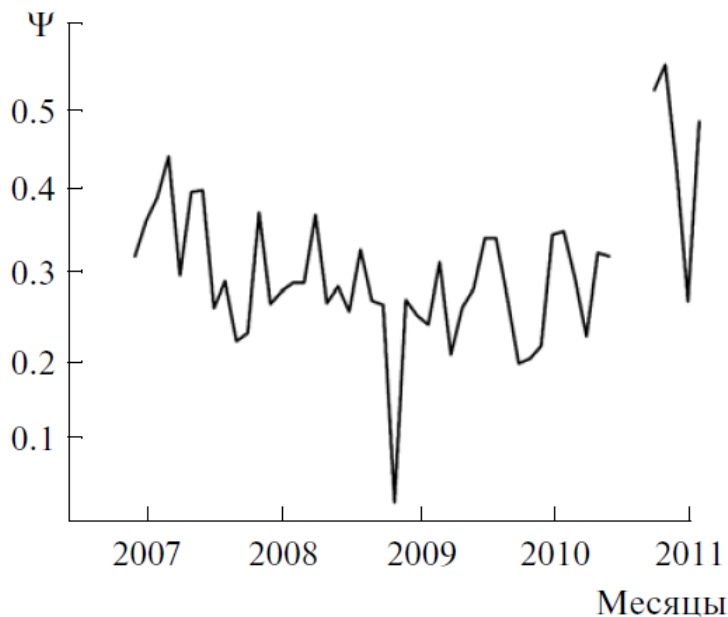


Рисунок 7. Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах, усредненная по месячным интервалам в 2007–2011 гг. Результаты диссертанта из работы [126].

2.2. Обсуждение результатов

Уровень мерцаний определяется интегральной по лучу зрения модуляцией амплитуды радиоволн. Если геометрия солнечного ветра близка к сферически симметричной, то основной вклад в индекс мерцаний вносит область вблизи прицельной точки луча зрения, которая находится на минимальном расстоянии от Солнца. Поэтому зависимость уровня мерцаний от элонгации определяется только расстоянием от прицельной точки до Солнца. Это хорошо соответствует суточному ходу уровня мерцаний в данных, приведенных на рисунках 5, 6, для наблюдений 2007, 2011 и отчасти 2010 гг. Однако в 2008–2009 гг. зависимость уровня мерцаний от элонгации и времени суток практически отсутствует.

В работе [136] обнаружено, что количество мерцающих источников, обнаруживающихся в стандартной, $8^\circ \times 8^\circ$, площадке в 2008 г. практически не зависело от элонгации. Согласно работе [124], зависимость индекса мерцаний сильных мерцающих источников от элонгации в 2006-2007 гг. оказалась слабее, чем предсказывает сферически симметричная модель солнечного ветра.

Все эти эффекты могут быть объяснены влиянием гелиосферного токового слоя с сильно повышенным абсолютным уровнем турбулентности. Присутствие такого слоя приводит к тому, что в минимуме солнечной активности существенный или даже определяющий вклад в модуляцию радиоволн на всех наблюдаемых элонгациях вносят низкоширотные, примыкающие к орбите Земли области солнечного ветра. Отметим, что минимум 23/24 цикла солнечной активности оказался аномально глубоким: индексы солнечной активности в 2008–2009 гг. были самыми низкими за последние 75 лет [137]; зафиксирован также длительный, более 200 дней, период, когда пятен на поверхности Солнца не было вообще [138].

Более слабое подавление влиянием токового слоя зависимости уровня мерцаний от элонгации в осенние месяцы по сравнению с зимними связано с тем, что в осенние месяцы Земля находится в южной гелиосфере, а в весенние месяцы – в северной. При этом луч зрения на источники северного неба проходит в гелиосферном слое осенью большую толщину, чем весной. Такого рода северо-южная асимметрия в уровне мерцаний будет заметной, если гелиосферный слой приэкваториальный, а его широтная протяженность невелика, менее 15° . Согласно результатам, приведенным в [9], именно такая структура реализовалась в период глубокого минимума солнечной активности 2008–2009 гг. в распределениях средней концентрации и скорости солнечного ветра.

Как следует из данных, приведенных на рисунках 5, 6, наблюдения мерцаний позволяют исследовать динамику турбулентного солнечного ветра в цикле солнечной активности: концентрация абсолютного уровня турбулентности к экваториальной плоскости возрастала между 2007 и 2008 гг., была сильной в 2008–2009 гг. и ослабевала в 2010–2011 гг. на восходящей фазе нового 24 цикла.

Приведенные на рисунке 7 месячные средние значения уровня мерцаний изменялись синхронно с уровнем солнечной активности. На рисунке 7 обращает на себя внимание резкое понижение уровня мерцаний в октябре-ноябре 2008 г. Эта особенность, которая по амплитуде превосходит типичные вариации от месяца к месяцу и является значимой, требует отдельного анализа и сопоставления с данными, полученными другими методами. Отметим также существенно неоднородный и нестационарный характер распределения параметров солнечного ветра, который следует из данных, приведенных на рисунках 5–7.

Локальный максимум уровня мерцаний в направлениях, близких к антисолнечному (рисунки 5, 6) зафиксирован впервые. Этот максимум не может быть объяснен неоднородностями солнечного ветра. Действительно, при наблюдении в антисолнечном направлении поперечная к лучу зрения составляющая скорости солнечного ветра близка к нулю, так что временные флуктуации с масштабами порядка секунды могут обеспечиваться только очень мелкими неоднородностями, для которых уровень флуктуации плотности в силу убывающего энергетического спектра турбулентности будет мал. Поэтому в антисолнечном направлении для уровня мерцаний можно ожидать локального минимума, а не максимума. Природа локального максимума в антисолнечном направлении пока неясна. Возможно, что в этом направлении на слабом фоне межпланетных мерцаний проявляются неоднородности плотности плазмы ночного хвоста земной магнитосферы или повышение вклада ионосферных мерцаний на секундных временных масштабах.

2.3. Выводы по главе 2

В 2008-2010 гг., пришедшиеся на минимум 23/24 цикла солнечной активности, радиальная зависимость уровня межпланетных мерцаний была сильно подавлена по сравнению с 2007 г., пришедшимся на фазу спада 23 цикла, и 2011 г., пришедшимся на фазу роста 24 цикла. Такой эффект не согласуется со

сферически симметричной моделью солнечного ветра, согласно которой основной вклад в мерцания дает турбулентная плазма вблизи прицельной точки. Наблюдаемый эффект можно интерпретировать как влияние гелиосферного токового слоя. Связанная с этим слоем область повышенной турбулентности плазмы в минимуме солнечной активности вносит существенный вклад в мерцания. Она просвечивается источниками на любых элонгациях, что и приводит к ослаблению радиальной зависимости. Полученные результаты показывают, что сильное отличие от сферической симметрии в минимуме солнечной активности характерно не только для средних параметров плазмы солнечного ветра, но и для уровня мелкомасштабной турбулентности. Кроме того, показано, что усредненный по всем элонгациям на месячных интервалах уровень мелкомасштабной турбулентности плазмы солнечного ветра изменяется синхронно с уровнем солнечной активности. Таким образом, можно утверждать, что наблюдения ансамбля слабых мерцающих источников является эффективным методом исследования глобальной структуры турбулентного солнечного ветра и ее динамики в цикле солнечной активности.

Глава 3. Оценка угловых размеров радиоисточника по наблюдениям насыщенных межпланетных мерцаний

Классическим способом оценки углового размера радиоисточника является интерферометрия. Однако угловое разрешение $\sim 0.1''$ на метровых волнах может быть достигнуто лишь при базе интерферометра $\sim 5\,000$ км. На сегодняшний день в этом диапазоне волн нет интерферометров с такой базой, что связано с малым временем когерентности в этом диапазоне. Наблюдения межпланетных мерцаний позволяют оценивать угловой размер источника с помощью одиночной антенны. Само наличие доступных для наблюдения мерцаний указывает, что угловой размер источника не больше $1'$ ($\sim 0.1''$ для отчетливо выраженных мерцаний). Существуют методы более точной оценки. Ниже будет представлен впервые примененный метод оценки угловых размеров радиоисточника по наблюдениям межпланетных мерцаний в режиме насыщения. Этим методом был оценен угловой размер источника В0531+194. Полученная оценка хорошо согласуется с данными, полученными на других частотах. Эти результаты опубликованы в работе [139].

3.1. Методы оценки углового размера источника по наблюдениям межпланетных мерцаний

Угловой размер мерцающего радиоисточника можно оценить по зависимости индекса мерцаний m от элонгации ε в условиях невозмущенной плазмы. Зависимость $m = m(\varepsilon)$ для точечного источника получена просвечиванием плазмы с космических аппаратов, которые можно считать точечными источниками. В режиме насыщенных мерцаний индекс мерцаний близок к единице и практически не меняется с элонгацией, а в режиме слабых мерцаний уменьшается с ростом элонгации. Для источников ненулевого размера зависимость будет иной. В режиме насыщенных мерцаний индекс мерцаний увеличивается с элонгацией, достигает максимума в переходной зоне между

режимами насыщенных и слабых мерцаний и в режиме слабых мерцаний уменьшается с ростом элонгации. Построены теоретические кривые $m = m(\varepsilon)$ для источников разных угловых размеров θ [140]. Таким образом, угловой размер можно оценить, построив по наблюдениям кривую $m = m(\varepsilon)$ и подобрав теоретическую кривую $m(\varepsilon, \theta)$, наилучшим образом ее приближающую. Однако мерцающие космические радиоисточники состоят, как правило, из компактного мерцающего компонента (ядра) и протяженного немерцающего компонента (гало). Флуктуации плотности потока обеспечиваются только ядром, в то время как средняя плотность потока есть суммарная плотность потока ядра и гало. Поэтому зависимость $m = m(\varepsilon)$ будет иметь уже два свободных параметра – угловой размер ядра и соотношение потоков ядра и гало. Кроме того, кривые $m = m(\varepsilon)$ [140] построены в модели сферически симметричного солнечного ветра. Эта модель заведомо не точна, т.к. в минимуме солнечной активности солнечный ветер имеет выраженную бимодальную структуру, а в максимуме активности зависимость $m = m(\varepsilon)$ искажается частыми выбросами корональной массы. Кроме того, на эту зависимость оказывает влияние гелиосферный токовый слой [124].

Другой способ основан на использовании спектра мощности. В случае сферически симметричной среды режиме слабых мерцаний он имеет вид [34]

$$P(f) = 4A\lambda^2 \int \frac{dz}{v_{\perp}(z)} \int dq_{\perp} \Phi_e(q) \sin^2\left(\frac{q^2 z}{2k}\right) F^2\left(\frac{qz}{2k}\right). \quad (3.1)$$

Интегрирование ведется по лучу зрения от наблюдателя до источника. При интегрировании принимается, что $q_{\parallel} = \frac{2\pi f}{v_{\perp}(z)}$.

Здесь $A = 5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$, λ – длина волны излучения, k – волновое число, z – координата вдоль луча зрения, f – временная частота, $v_{\perp}(z)$ – проекция скорости солнечного ветра в точке z на картинную плоскость, q – пространственная частота, q_{\parallel} – составляющая пространственной частоты вдоль скорости солнечного ветра, $\Phi_e(q)$ – пространственный спектр флуктуаций электронной плотности плазмы, $F\left(\frac{qz}{2k}\right)$ – пространственный спектр

радиоисточника, $q_z = 0$. Пространственный спектр радиоисточника обычно задается в изотропном гауссовом виде: $F^2(\vec{q}) = e^{-\frac{q^2 z^2 \theta_0^2}{2}}$. Таким образом, если известны спектр турбулентности плазмы и скорость солнечного ветра, можно оценить угловой размер источника. Разработана также методика одновременной оценки углового размера источника и показателя степени трехмерной турбулентности плазмы по известной скорости солнечного ветра с использованием формулы (3.1) [43]. Она основана на построении достаточно плотной сетки теоретических спектров мощности при данной скорости солнечного ветра и разных значениях углового размера и показателя спектра турбулентности и выборе из этой сетки кривой, оптимально описывающей наблюдаемый спектр.

Для точечного источника характерная частота излома во временном спектре мерцаний определяется френелевским масштабом и скоростью солнечного ветра v и равняется $f_0 = v/2\pi a_\phi$ [34]. Существенное подавление мерцаний за счет собственного углового размера источника происходит, если $z_0 \theta_0 \gg a_\phi$, в противном случае источник может рассматриваться как точечный. Здесь z_0 – расстояние от наблюдателя до эффективно модулирующего слоя, равное $z_0 = 1a.e. \cos \varepsilon$, где ε – элонгация источника.

3.2. Впервые примененный метод оценки углового размера источника

Впервые примененный метод оценки углового размера основан на наблюдениях насыщенных мерцаний.

В соответствии с расчетами [34 – 35], временной спектр насыщенных мерцаний точечного источника имеет двухкомпонентный вид с характерными частотами излома $f_{диф} = \frac{v}{2\pi b_{диф}}$ и $f_{реф} = \frac{v}{2\pi b_{реф}}$, где v – скорость солнечного ветра, $b_{диф}$ и $b_{реф}$ – дифракционный и рефракционный масштабы, соответственно. Основной вклад в индекс мерцаний вносят дифракционные мерцания. При сближении с

Солнцем дифракционный масштаб $b_{\text{диф}}$ уменьшается, в силу чего частота $f_{\text{диф}}$ возрастает. В то же время дисперсия мерцаний точечного источника в режиме насыщения не зависит от расстояния до Солнца. Таким образом, интеграл от спектра мощности сохраняется, и возрастание $f_{\text{диф}}$ приводит к уменьшению спектральной плотности на частотах $f \leq f_{\text{диф}}$.

Источники с угловыми размерами $z_0\theta_0 > a_\phi$ практически не влияют на уровень рефракционных мерцаний и подавляют дифракционные мерцания, что выражается в обрезании временного спектра на частотах

$$f > f_{\text{кр}} = \frac{v}{2\pi z_0 \theta_0}, \quad (3.2)$$

причем частота $f_{\text{кр}}$ при постоянной скорости солнечного ветра не будет зависеть от расстояния до Солнца, в отличие от частоты $f_{\text{диф}}$, которая из-за увеличения угла рассеяния должна возрастать при сближении источника с Солнцем [139]. Высокочастотное обрезание спектра приводит также к уменьшению индекса мерцаний при уменьшении элонгации. Это связано с упомянутым выше уменьшением спектральной плотности дифракционной части спектра.

В области, разделяющей режимы слабых и насыщенных мерцаний, индекс мерцаний источника ненулевого углового размера достигает максимального значения, которое приближенно равно

$$m_{\text{max}} \approx \delta_c (1 + \theta_0^2 / \theta_\phi^2)^{-1/2}, \quad (3.3)$$

где $\theta_\phi = a_\phi / z_0$ – угловой размер френелевского масштаба, $\delta_c = I_c / (I_h + I_c)$ – доля компактного компонента в интегральной плотности потока (I_c и I_h – плотности потока ядра и гало источника, соответственно) [139]. Соотношения (3.2), (3.3) позволяют по измеренным значениям $f_{\text{кр}}$ и m_{max} и известной скорости солнечного ветра оценить угловой размер источника и долю потока в мерцающем компоненте.

3.3 Результаты наблюдений

Источник V0531+194 (J0534+1927) наблюдался в 2011 г. на второй диаграмме БСА с помощью аналогового приемника (см. гл. 1). Минимальная элонгация источника достигается 16 июня и составляет $03^{\circ} 52'$. Однако на этой элонгации источник слишком близок к Солнцу по прямому восхождению, и поэтому Солнце в боковых лепестках диаграммы направленности БСА «засвечивает» радиоисточник. Обработывались наблюдения с 23 июня, когда элонгация составляла $07^{\circ} 57'$. Наблюдения были завершены 25 августа 2011 г. на элонгации 67° .

На рисунках 8-9 показан спектр мощности мерцаний V0531+194 в режиме слабых мерцаний и в режиме насыщенных мерцаний, соответственно.

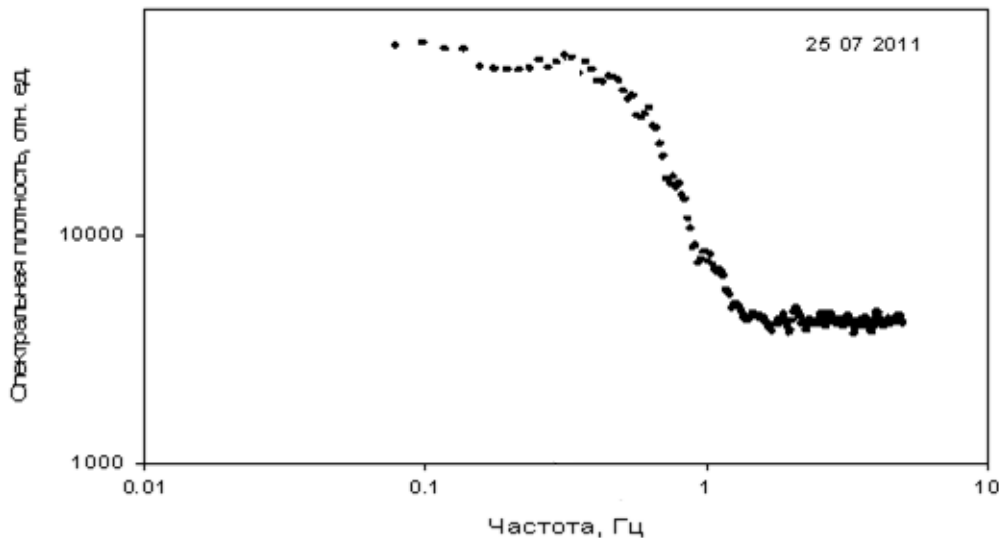


Рисунок 8. *Временной спектр мерцаний источника V0531+194 25 июля 2011 г. (режим слабых мерцаний). Масштаб по обеим осям логарифмический. Результаты диссертанта из работы [139].*

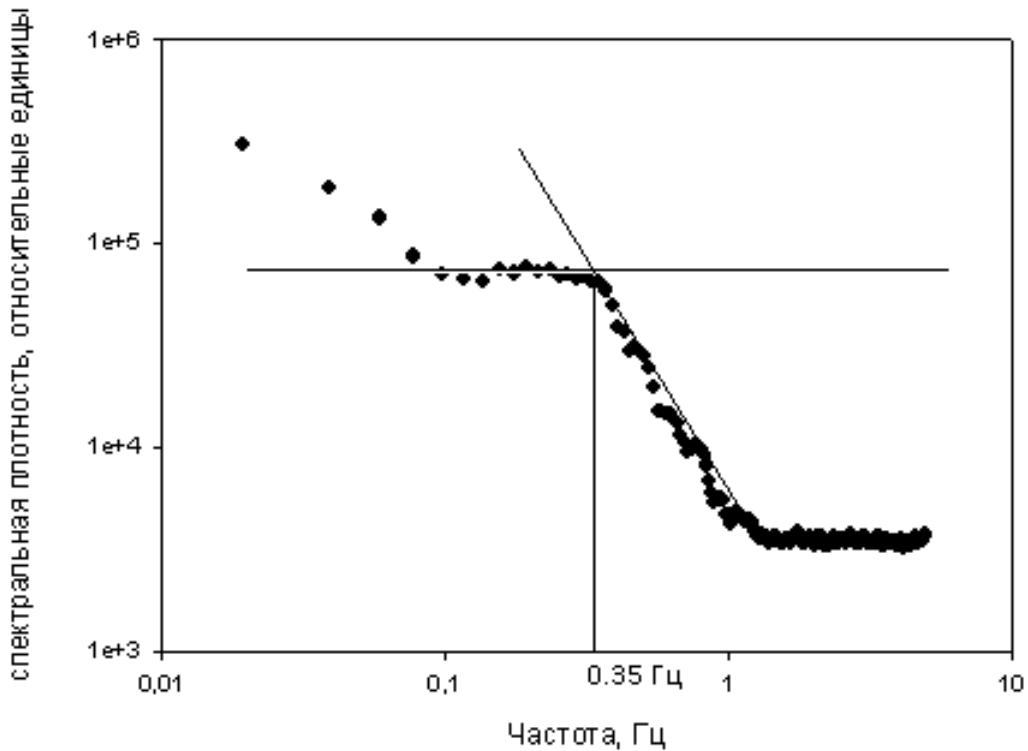


Рисунок 9. *Временной спектр мерцаний источника V0531+194 07 июля 2011 г. (режим насыщенных мерцаний). Масштаб по обеим осям логарифмический. Характерная частота излома спектра составляет около 0,35 Гц. Прямые линии иллюстрируют методику определения частоты излома. Результаты диссертанта из работы [139].*

Как показывают рисунки 8-9, спектры в режиме слабых и насыщенных мерцаний качественно схожи. Однако частота излома в этих спектрах имеет различную природу. Для режима слабых мерцаний это френелевская частота, а для режима насыщенных мерцаний – частота $f_{кр}$ из формулы (3.2), зависящая от углового размера источника. Кроме того, в спектре насыщенных мерцаний есть участок повышенной спектральной плотности на низких частотах, соответствующий рефракционным мерцаниям.

Характерная частота излома спектра определялась, как это показано на рисунке 9: в наклонный и горизонтальный участки спектра вписывались прямые, и характерная частота излома определялась по точке пересечения этих прямых.

Характерная частота излома временного спектра мерцаний в режиме насыщенных мерцаний, как показывает рисунок 10, практически не меняется с элонгацией. Это объясняется тем, что излом определяется влиянием ненулевого углового размера источника. Критическая частота, обусловленная угловым размером источника, оказалась близка к френелевской, поэтому характерная частота излома в режиме слабых мерцаний оказалась близка к характерной частоте излома в режиме насыщенных мерцаний. Поэтому характерная частота излома практически не меняется с элонгацией за весь период наблюдений.

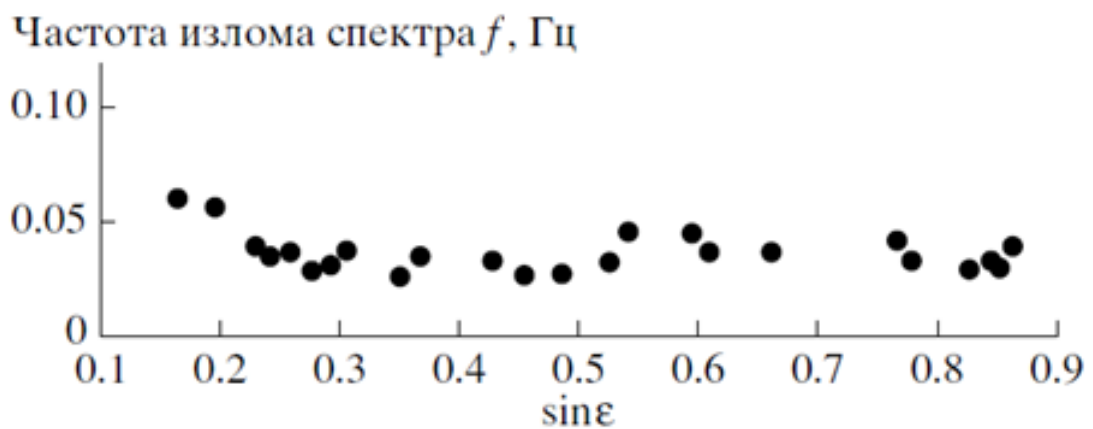


Рисунок 10. Характерная частота излома временного спектра мерцаний источника V0531+194 в зависимости от синуса элонгации за период наблюдений 23 июня – 31 августа 2011 г. Результаты диссертанта из работы [139].

На рисунке 11 приведена полученная по всей серии наблюдений зависимость индекса мерцаний от элонгации. При элонгациях около 20° индекс мерцаний максимален; эта область, которая наблюдалась 7–8 июля, соответствует переходу от режима насыщенных мерцаний к режиму слабых мерцаний. Уменьшение индекса мерцаний при уменьшении элонгации на участке $\varepsilon < 20^\circ$ обусловлено ненулевым угловым размером источника. Для точечного источника этот участок графика был бы горизонтальным.

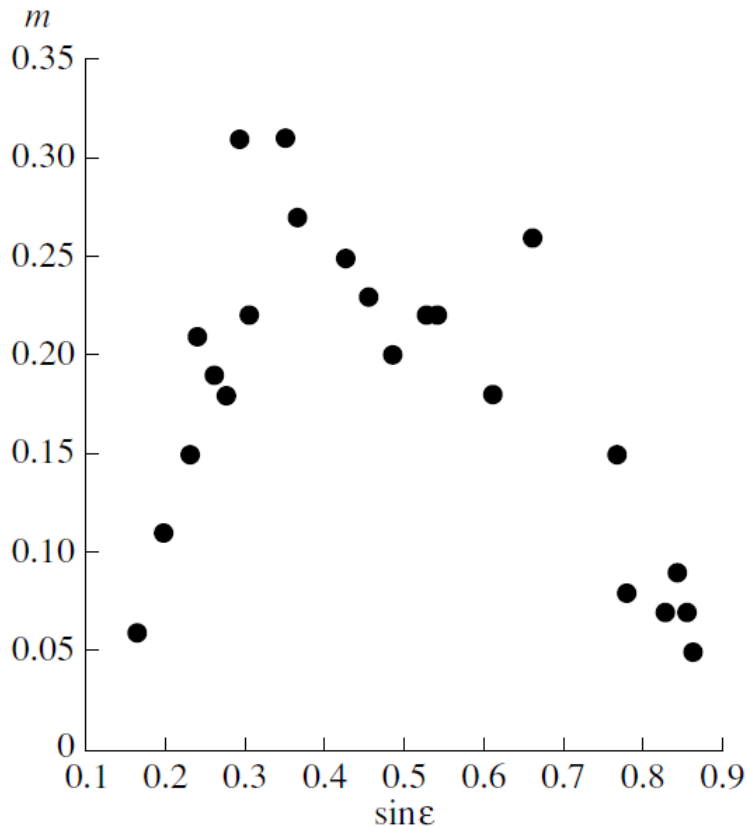


Рисунок 11. *Индекс мерцаний источника B0531+194 в зависимости от синуса элонгации 23 июня – 31 августа 2011 г. Масштаб по обеим осям линейный. Результаты диссертанта из работы [139].*

Угловой размер мерцающего компонента источника оценивался по формуле (3.2) для 8 дней наиболее качественных наблюдений в режиме насыщенных мерцаний. Среднее значение углового размера составило $0.24''$, среднеквадратичное отклонение – $0.05''$. Как показано на рисунке 11, максимальный индекс мерцаний составил около 0.3. По формуле (3.3), считая $I_c + I_h = 1$, можно оценить долю мерцающего компонента в интегральной плотности потока как 0.3. Для данных о частоте излома, приведенных на рисунке 10, практически отсутствует различие между режимом слабых мерцаний и режимом насыщения. Это естественным образом объясняется тем, что частота, соответствующая френелевскому масштабу и составляющая по нашим оценкам

0.35 Гц, оказалась близкой к частоте, соответствующей угловому размеру ядра источника.

Для расчетов по формуле (3.2) использовались значения скорости солнечного ветра, полученные в университете Нагойя методом разнесенного приема в те же дни для того же источника [141]. Значения скорости составляли от 300 до 450 км/с, что типично для низких гелиоширот в данной фазе солнечной активности (эклиптическая широта источника на 2011 г. составляла около -4°). По данным спутника GOES [142], в период насыщенных мерцаний источника В0531+194 (с 23 июня до 7–8 июля 2011 г.) на Солнце не было ни одной вспышки класса выше C5.0. Вероятность безвспышечных крупномасштабных возмущений на больших расстояниях от Солнца невелика, поэтому естественно полагать, что межпланетная плазма находилась в невозмущенном состоянии. Заметим, что при определении интегральной плотности потока источника есть трудности, связанные с тем, что источник В0531+194 по прямому восхождению близок к источнику в Крабовидной туманности (3С 144) – одному из самых сильных радиоисточников небесной сферы. Источник 3С 144 будет заведомо давать какой-то вклад в интегральную плотность потока исследуемого источника в боковых лепестках антенны БСА.

3.4. Сравнение полученных оценок углового размера с известными данными

Источник В0531+194 используется в качестве калибровочного в VLA-наблюдениях. Единственное изображение источника, на котором источник разрешен, получено на частоте 8.285 ГГц с угловым разрешением $0.2168''$ (неопубликованные наблюдения VLA [143]). На изображении видно, что источник состоит из двух компонентов размером не более $0.2''$ и расстоянием между этими компонентами $0.4 - 0.5''$. Плотности потоков этих компонентов не приводятся. Более протяженных структур на изображении нет. Есть также наблюдения источника на VLA в конфигурации А на частотах 1.4 и 5 ГГц с

угловым разрешением $2''$ и $0.6''$, соответственно [144]. В работе утверждается, что протяженных структур на уровне $\sim 1\%$ от пиковой плотности потока в источнике не обнаружено.

К сожалению, изображение источника не приведено. В то же время отмечается, что есть некая протяженная структура, простирающаяся на расстояние до $0.5''$ от источника. По-видимому, один из компонентов источника, видимый на 8.285 ГГц, был принят за основной, а второй компонент – за его протяжение. Источник наблюдался также методом межпланетных мерцаний на частоте 327 МГц [145]. В этих наблюдениях угловой размер источника оценен по спектру слабых мерцаний как $0.115''$. Утверждается также, что в мерцающем компоненте источника содержится примерно треть (0.29) от интегральной плотности потока источника, которая оценена из спектра, построенного по литературным данным, как 15.1 Ян.

В наблюдениях на 2.3 и 8.4 ГГц с угловым разрешением $0.05''$ и $0.015''$, соответственно, обнаружен коррелированный поток 0.13 и 0.03 Ян [146].

В наблюдениях с разрешением 3 мсек. дуги на частоте 2.3 ГГц [147] коррелированный поток не был обнаружен на уровне 0.11 Ян. В наблюдениях на 22 ГГц с разрешением 3 мсек. дуги коррелированный поток не обнаружен на уровне 0.2 Ян [148].

Наконец, в неопубликованных наблюдениях VLA, проведенных на частоте 8.6 ГГц с угловым разрешением $0.05''$, обнаружен коррелированный поток на уровне 0.05 Ян на угловых масштабах от $0.05''$ до 3.5 мсек. дуги [143]. Таким образом, наблюдения с угловым разрешением лучше, чем несколько сотых долей угловой секунды, показывают, что подавляющая часть энергии от источника приходит с масштабов порядка долей угловой секунды.

Суммируя все наблюдения источника, сделанные с высоким угловым разрешением, можно заключить, что его угловой размер не превышает $0.5''$. Таким образом, полученная оценка углового размера источника в $0.24'' \pm 0.05''$ согласуется с оценками, полученными другими авторами.

Заметим также, что из-за рассеяния на межзвездной плазме видимые угловые размеры источников вблизи плоскости Галактики должны возрастать. Межзвездное рассеяние ограничивает снизу наблюдаемый угловой размер источника. По наблюдениям мерцающих источников на частоте 102 МГц показано, что на галактической широте 4° наблюдаемые угловые размеры источников не могут превышать $\sim 0.2''$ [149]. Поэтому, даже если источник В0531+194 имеет существенно меньшие размеры, будет наблюдаться диск рассеяния размером в $\sim 0.2''$.

На рисунке 12 приведен спектр источника В0531+194 по данным NED [150] и VLA [143]. Интегральному спектру соответствуют темные кружки. На этом же рисунке светлыми кружками обозначены пиковые плотности потоков, взятые из неопубликованных наблюдений VLA на частотах от 1.48 до 14.94 ГГц с угловым разрешением $5''$ или лучше [143]. На рисунке также добавлены оценки плотности потока компактных радиоисточников, извлеченные из наблюдений мерцаний на 327 МГц [145], и полученная в настоящей работе оценка на 111 МГц.

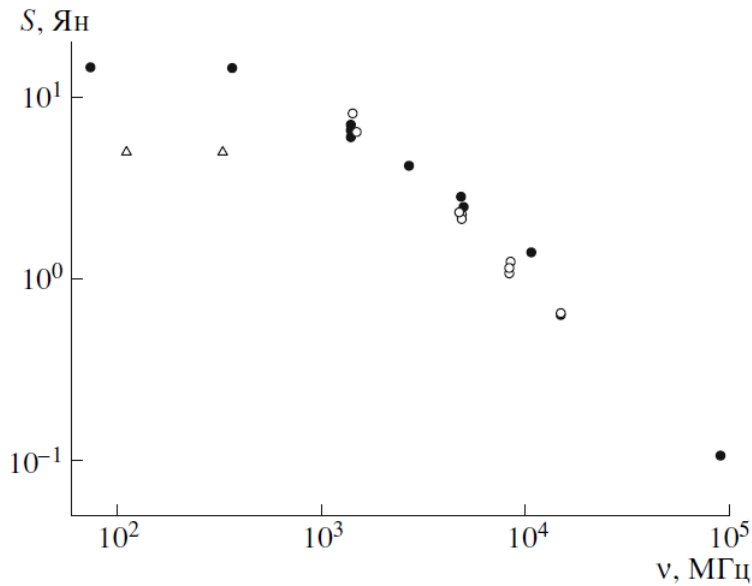


Рисунок 12. Спектр источника B0531+194 по данным NED [150] и VLA [143]. Точки интегрального спектра – темные кружки, пиковые плотности потока – светлые кружки. Точки VLA обозначены кружками, оценки, полученные по мерцаниям, – треугольниками.

Как видно из рисунка 12, согласно наблюдениям на частотах 365 и 74 МГц интегральный спектр источника в низкочастотной области становится плоским, и есть возможность интерполировать ожидаемую плотность потока на 111 МГц. Исходя из ожидаемой интегральной плотности потока 15 Ян и соотношения плотности потоков ядро/(гало + ядро) = 0.33, оцениваем плотность потока компактного компонента 5 Ян. Согласно спектру на рисунке 12, заметного гало, имеющего угловые размеры больше 5", у источника B0531+194 до частоты 1.4 ГГц нет. Неопределенности при определении плотностей потока на частоте 1.4 ГГц составляют по разным наблюдениям 1 Ян. Если предположить, что гало на частоте 1.4 ГГц имеет плотность потока 0.5 Ян, то значение спектрального индекса компонента "гало" будет 1.2, что находится в разумных пределах и позволяет объяснить интегральные плотности потока на низких частотах в спектре на рисунке 12.

3.5. Выводы по главе 3

Впервые применен способ оценки углового размера космического радиоисточника по наблюдениям межпланетных мерцаний в режиме насыщения. Этот способ основан на связи характерной частоты излома временного спектра межпланетных мерцаний в режиме насыщения с угловым размером источника и скоростью солнечного ветра. В отличие от сравнения полученного временного спектра мерцаний с теоретическим, данный метод не требует предположений о показателе турбулентности плазмы. В отличие от определения углового размера по зависимости индекса мерцаний от элонгации, метод требует наблюдений лишь в относительно узкой области перехода от насыщенных мерцаний к слабым, а не во всем диапазоне элонгаций, а также не использует абсолютного значения максимума этой зависимости, которое может меняться от года к году. Эти факты можно отнести к достоинствам метода. Однако метод требует наблюдений источника на элонгациях менее 20 градусов, которые достижимы лишь для 10-20% источников северной полусферы. Это можно отнести к недостаткам метода.

Указанным методом оценен угловой размер источника B0531+194 (J0534+1927). Оценка составила $0.24'' \pm 0.05''$, что согласуется с данными других авторов, полученными на высоких частотах. В дальнейшем метод может быть применен к другим источникам, наблюдаемым на малых элонгациях.

Глава 4. Детектирование выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний в 2011-2012 гг.

Физика корональных выбросов массы (a coronal mass ejection, CME) активно изучается. На сегодняшний день нет полной картины динамики и даже кинематики CME, дискутируется природа взаимосвязи CME с солнечными вспышками, есть много других неразрешенных вопросов. В связи с этим востребовано накопление наблюдательной информации о CME и их взаимосвязи с активными процессами на Солнце и геомагнитными возмущениями. В этой главе излагаются результаты детектирования CME методом межпланетных мерцаний в годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. Полученные данные сопоставляются с данными о рентгеновских вспышках на Солнце и геомагнитных возмущениях. Изложенные результаты опубликованы в работе [133].

4.1. Методы детектирования CME

Выброс корональной массы можно обнаружить разными способами. Развитие CME в короне может быть обнаружено в рентгеновском диапазоне [151]. CME наблюдаются в белом свете с помощью коронографа LASCO на борту космического аппарата SOHO [152 – 153], с помощью инструмента SMEI на борту Coriolis [154], и т.д. Наблюдения CME являются основной задачей миссии STEREO [155]. Однако коронографы могут обнаруживать CME лишь на сравнительно небольших расстояниях от Солнца. Это может быть связано как с ограниченным полем зрения (в частности, поле зрения коронографа LASCO составляет 32 солнечных радиуса), так и с убыванием яркости CME в белом свете с удалением от Солнца.

CME распознаются также по всплеску характерной энергии частиц межпланетной плазмы [156 – 157]. Недостаток таких измерений в их

локальности: характеристики СМЕ измеряются лишь там, где находится аппарат, и нет возможности проследить их динамику по мере движения СМЕ.

Около половины СМЕ связаны со вспышками [98, 102], которые могут наблюдаться в оптическом, рентгеновском и радиодиапазоне. В случае прихода выброса к Земле возможны магнитные бури, индикатором которых, в частности, являются резкие падения напряженности магнитного поля экваториального кольцевого тока. Однако солнечные вспышки и магнитные бури являются лишь косвенными свидетельствами произошедших СМЕ. Как вспышки, так и магнитные бури происходят и в отсутствие выбросов (в частности, магнитная буря может быть вызвана безмассовой ударной волной или CIR). С другой стороны, выбросы тоже не всегда сопровождаются вспышками и не всегда вызывают геомагнитные возмущения.

Ни один из этих способов наблюдения выброса корональной массы не дает полной информации о его физических характеристиках. Детальное изучение СМЕ требует привлечения данных обо всех наблюдаемых проявлениях выброса [158 – 160].

Одним из способов детектирования СМЕ внутри орбиты Земли является метод межпланетных мерцаний. При этом используется то обстоятельство, что плазма в окрестности фронтальной части СМЕ обладает большей плотностью и повышенным уровнем турбулентности по сравнению с невозмущенной фоновой плазмой солнечного ветра. Поэтому пересечение выбросом луча зрения на мерцающий источник должно приводить к усилению мерцаний по сравнению со спокойными условиями.

4.2. Способы детектирования СМЕ по наблюдениям межпланетных мерцаний

Классический способ поиска крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме связан с наблюдением набора компактных

радиоисточников. Для каждого источника строится зависимость индекса мерцаний от элонгации (наблюдения занимают от нескольких месяцев до полугода). Предполагается, что эта зависимость является эталонной. Текущая оценка индекса мерцаний сравнивается с эталонной, сделанной на той же самой элонгации. Считается, что наблюдалось возмущение, если текущая оценка индекса мерцаний заметно превосходит эталонную оценку. Подобный способ использовался в работе [21], но вместо индекса мерцаний использовалось абсолютное значение флуктуаций плотности потока, что требует еще учета ежедневно меняющейся чувствительности антенны.

Наблюдение набора отдельных сильных источников обеспечивает достаточно малую плотность наблюдаемых источников на небесной сфере. В частности, время прохождения источника через луч диаграммы направленности БСА ФИАН – около 10 минут, а зона элонгаций, оптимальных для наблюдения мерцаний, составляет 20-60 градусов. Данный способ обеспечивает плотность сетки мерцающих источников в наблюдаемой площадке БСА не лучше, чем один источник на 100-200 кв. градусов.

В последние годы был предложен другой способ, основанный на наблюдении статистического ансамбля слабых мерцающих источников [125]. Для модернизированного телескопа БСА чувствительность, по-видимому, выше уровня путаницы мерцающих источников (см. главу 1), поэтому радиотелескоп принимает суммарный сигнал массива слабых источников, из которого вклад отдельного источника выделить не удастся. Однако можно оценить среднюю дисперсию мерцающего потока, которая пропорциональна среднему индексу мерцаний (см. главу 2). Зафиксируем на небе относительно Солнца несколько одинаковых по размерам площадок. Поскольку распределение источников на небе близко к распределению Пуассона, в площадки одинаковых размеров будет попадать в среднем одинаковое число радиоисточников. Из-за суточного движения Солнца источники будут перемещаться внутри выбранных площадок и переходить из одной площадки в другую, однако, если площадки достаточно велики, свойства статистического ансамбля источников не меняются от

площадки к площадке. Поэтому средняя дисперсия мерцающего потока в площадке будет определяться только свойствами просвечиваемой плазмы. Для разных площадок она будет в общем случае различна, что связано с глобальной структурой солнечного ветра. В то же время в отсутствие крупномасштабных возмущений уровень мерцаний в данной площадке не будет зависеть от времени (напомним, что площадки выбираются фиксированными относительно Солнца). Средняя дисперсия мерцающего потока, измеренная в единицах аналого-цифрового преобразователя, будет меняться вместе с чувствительностью радиотелескопа, но это можно исправить усреднением значений для данной площадки за достаточно большой промежуток времени. Резкое увеличение мерцающего потока в данной площадке по сравнению с эталонным для данной площадки значением и будет служить маркером возмущения.

Точность эталонной шкалы невысока. Например, в работе [43] можно видеть, что погрешности измерений индекса мерцаний источника при наблюдениях на одних и тех же элонгациях могут достигать 30%. Кроме того, как показано в работе [161] зависимость индекса мерцаний от элонгации может быть разной в минимуме и максимуме цикла солнечной активности. Т.о., зависимость уровня мерцаний от элонгации, полученную по данным одного года, нельзя использовать как эталонную для другого года. Использовать этот способ выгоднее всего постфактум. Т.е. поиск возмущений нужно проводить уже после того, как построена зависимость индекса мерцаний от элонгации, и искать возмущение по точкам, выпавшим из наблюдаемой зависимости.

Избавиться от этого недостатка можно, если сравнивать индекс мерцаний за текущий день с индексом мерцаний за предыдущий. Этот способ использовался в работах [30, 31, 42] и в нижеизложенных результатах работы [133]. Основная идея этого способа в том, что в случае невозмущенной плазмы индекс мерцаний меняется с элонгацией достаточно медленно [140]. Поэтому, если индекс мерцаний в течение одного дня увеличился достаточно резко, это может служить надежным критерием детектирования возмущения – особенно когда такой всплеск мерцаний произошел у многих источников одновременно.

Если оценивается не индекс мерцаний одиночного источника, а уровень мерцаний статистического ансамбля, можно проводить интервальную (промежуток 2-3 минуты) оценку флуктуаций плотности потока и сравнивать эту оценку с оценкой на том же интервале в предыдущий день. Однако значение флуктуаций плотности потока источника в единицах аналого-цифрового преобразователя за текущий день отражает не только уровень мерцаний, но и текущую чувствительность радиотелескопа. Чувствительность может меняться ото дня ко дню под влиянием погодных условий и других факторов. Таким образом, оценка отношения величины флуктуаций плотности потока источника в единицах АЦП за текущий день к той же величине за предыдущий день будет иметь неопределенные погрешности. Для корректной оценки этого отношения необходимо знать величину флуктуаций плотности потока в янских. Т.к. в ходе наблюдений записываются все попавшие в площадку радиоисточники, можно сделать калибровку наблюдений, используя известные сильные источники. При этом возникают следующие трудности. Во-первых, ионосфера ежедневно смещает наблюдаемые координаты источников относительно их реальных координат (типичное смещение $5 - 7'$, максимальное наблюдавшееся $20 - 30'$). Из-за этого источник смещается относительно главного максимума диаграммы направленности, и его плотность потока может быть оценена неправильно. Во-вторых, плотность потока калибровочных источников на частоте работы БСА ФИАН неизвестна, и ее необходимо восстанавливать по опубликованным наблюдениям на других частотах. Принципиально обе проблемы решаемы, и погрешность в оценке плотности потока источника в янских на БСА в перспективе можно довести до 20%. Тогда окажется возможным применение этого способа, который потенциально продуктивнее всех остальных вышеописанных.

4.3. Наблюдения и методика

Наблюдения производились с июля 2011 по июнь 2012 гг. на радиотелескопе БСА ФИАН в шестнадцати лучах, покрывающих склонения от $17^{\circ} 20'$ до 25° с шестнадцатиканальным аналоговым приемником (см. гл. 1). С использованием методики, описанной в гл. 1, по наблюдательным данным был сформирован набор мерцающих источников. Усреднение данных, прошедших диаграммный фильтр, осуществлялось по месяцу, после чего по усредненным данным производился поиск источников. Пороговое значение сигнала, при котором принималось решение, что обнаружен мерцающий источник, выбиралось так, чтобы в наблюдаемой площадке каждый месяц находилось 100-150 мерцающих источников. Таким образом, для каждого месяца получился набор 100-150 источников, именно в этот месяц мерцавших наиболее сильно (эти наборы несколько различались между собой из-за изменения элонгаций источников). Непосредственная визуальная проверка показала, что метод не дал ложных обнаружений, во всех случаях были отобраны сильные мерцающие источники.

Для детектирования возмущений применялось сравнение индекса мерцаний за текущий день с индексом мерцаний за предыдущий. Возмущение считалось зарегистрированным, если не менее чем у пяти источников индекс мерцаний увеличился в 1.5 раза или более. Такое возрастание лежит за пределами типичных ошибок в оценке индекса мерцаний по наблюдениям БСА [43]. Отметим, что такой же критерий использовался в работе [42], где наблюдения детектировались по данным 1997-2009 гг. Во всех случаях, когда автоматика фиксировала всплеск мерцаний по вышеописанному критерию, производилась прямая визуальная проверка, чтобы исключить ложные обнаружения из-за помех.

Пример зарегистрированной таким образом вспышки приведен на рисунке 13. По горизонтальной оси отложено прямое восхождение источников, по вертикальной оси склонение источников, маленькие кружки отражают

местоположение источников, большой круг соответствует положению Солнца, проходящая через Солнце линия соответствует плоскости эклиптики.

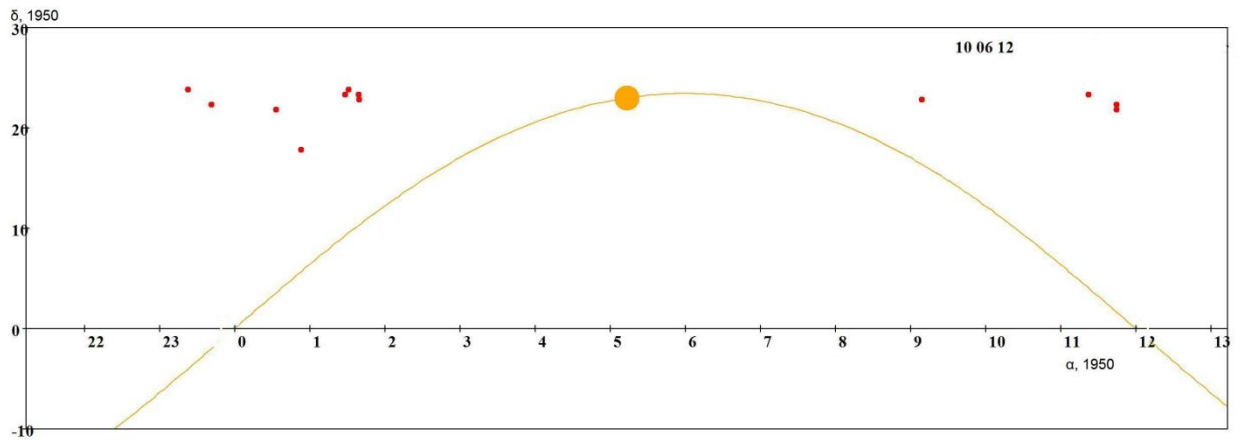


Рисунок 13. Источники, индекс мерцаний которых изменился более чем в 1.5 раза — 12 точек на карте. Симметричное расположение относительно Солнца (большой кружок) говорит о том, что возмущение направлено на Землю. Это возмущение от Солнца зафиксировано в мерцаниях 10 июня 2012 г. Результаты диссертанта из работы [133].

Полученные данные сравнивались с данными о рентгеновских вспышках на Солнце [142] и поведении геомагнитного индекса Dst [141]. О прохождении СМЕ могут свидетельствовать последовательно: вспышка в рентгеновском диапазоне, всплеск мерцаний и падение Dst. Однако заранее не известно, будет ли каждый выброс обнаружен всеми тремя способами. Не всякий СМЕ сопровождается вспышкой и не всякий СМЕ, даже пришедший в район Земли, возмущает магнитное поле. Поэтому представляется интересным сопоставить эти данные. Всего возможно восемь различных комбинаций, от «возмущение обнаружено всеми тремя способами» до «возмущение не обнаружено ни одним из способов». В последнем случае естественно считать, что никакого возмущения не было, для остальных семи проведен поиск возмущений. Принималось, что в данный день произошло заслуживающее внимания событие,

при соблюдении любого из трех следующих условий: а) рентгеновская вспышка класса M5.0 или выше; б) возрастание индекса мерцаний в 1.5 и более раза не менее чем у пяти радиоисточников; в) падение индекса Dst ниже -50 nT.

После регистрации значимого события хотя бы одним из трех способов необходимо решить, какими еще способами зарегистрировано это событие. Если значимое событие обнаруживалось по критерию Dst или мерцаний, при поиске связанных с ним рентгеновских вспышек просматривались вспышки класса M1.0 и выше. Если значимое событие обнаруживалось по критерию рентгеновских вспышек или мерцаний, при поиске связанных с ним падений Dst учитывались падения от -20 nT и ниже. При этом учитывалось, что регистрация СМЕ разными способами должна быть разнесена во времени. Рентгеновская вспышка соответствует рождению выброса, усиление мерцаний – распространению между Солнцем и Землей, а падение индекса Dst – воздействию на магнитосферу. Экстремально быстрым СМЕ на путь до Земли требуется около суток [158], типичны значения в 40-80 ч. [162]. Пусть, например, обнаружена рентгеновская вспышка класса выше M5.0 и через 1-3 дня замечено падение Dst ниже -20 nT. Тогда считается, что событие зафиксировано и в рентгеновском диапазоне, и в изменении Dst. Аналогично, если зарегистрировано падение Dst ниже -50 nT, и ему соответствует рентгеновская вспышка класса от M1.0, событие снова считается зафиксированным и в изменении Dst, и рентгеновском диапазоне. Сама по себе вспышка класса ниже M5.0, если ей не соответствует ни значимого всплеска мерцаний, ни падения Dst ниже -50 nT, значимым событием не считалась.

4.4. Результаты и обсуждение

Всего за год было обнаружено 34 события, информация о которых приведена в Таблице 1. В столбце «тип события» «sc» («scintillation») означает, что наблюдался всплеск мерцаний радиоисточников, «X» («X-ray») – что

наблюдалась вспышка в рентгеновском диапазоне, «Dst» – что наблюдалось падение геомагнитного индекса Dst.

Событие может быть зафиксировано надежно или не надежно. ненадежное детектирование события может быть связано с техническими проблемами радиотелескопа или внешними помехами. В этом случае мы не можем знать достоверно, имел ли место всплеск мерцаний, поэтому событие трудно классифицировать.

Таблица 1. События, обнаруженные с июля 2011 г. по июнь 2012 г. Данные о рентгеновских вспышках заимствованы из источника [142]. Данные о геомагнитной активности заимствованы из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний получены диссертантом и опубликованы в работе [133].

Дата события	Тип события	Надежность детектирования
30-31.07.2011	X+Dst	надежно
04-06.08.2011	X+sc+Dst	надежно
09.08.2011	X	не надежно
07-10.09.2011	X+sc+Dst	не надежно
16-17.09.2011	sc+Dst	не надежно
24-26.09.2011	X+sc+Dst	надежно
13-14.10.2011	sc	надежно
21-25.10.2011	X+sc+Dst	надежно
30-01.11.2011	sc+Dst	надежно
03-06.11.2011	X+sc	надежно
29-30.11.2011	sc+Dst	надежно
03.12.2011	sc+Dst	надежно
05.12.2011	sc	надежно
26-30.12.2011	X+sc+Dst	надежно

Дата события	Тип события	Надежность детектирования
19-23.01.2012	X+sc+Dst	не надежно
23-25.01.2012	X+sc+Dst	не надежно
27-29.01.2012	X+sc	не надежно
15.02.2012	Dst	не надежно
19.02.2012	Dst	не надежно
27.02.2012	Dst	не надежно
02-04.03.2012	X+sc	надежно
05-07.03.2012	X+sc+Dst	надежно
07-09.03.2012	X+sc+Dst	надежно
09-12.03.2012	X+sc+Dst	надежно
13-15.03.2012	X+Dst	надежно
26-28.03.2012	sc+Dst	надежно
05.04.2012	Dst	не надежно
22-24.04.2012	sc+Dst	надежно
09-11.05.2012	X+Dst	не надежно
17-18.05.2012	X+sc	надежно
20-23.05.2012	sc+Dst	надежно
31.05.2012	sc	надежно
10-12.06.2012	X+sc+Dst	надежно
13-17.06.2012	X+sc+Dst	надежно

Для наглядности данные из таблицы собраны на рисунке 14 в гистограмму.

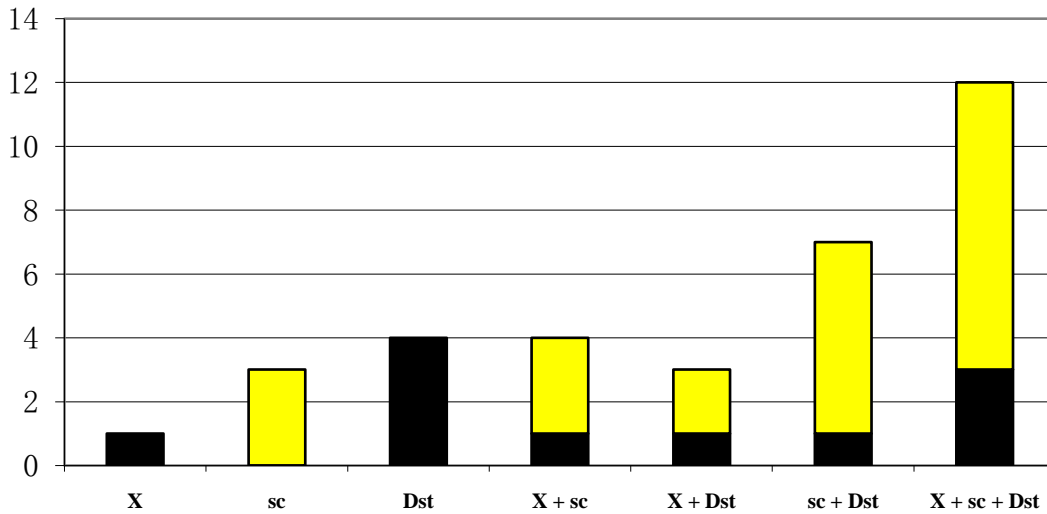


Рисунок 14. События, обнаруженные с июля 2011 г. по июнь 2012 г. По вертикальной оси отмечено количество событий того или иного типа. По горизонтальной оси дан тип события. Светлым цветом отмечены надежно зафиксированные событие, черным цветом – ненадежно зафиксированные. Данные о рентгеновских вспышках заимствованы из источника [142]. Данные о геомагнитной активности заимствованы из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний получены диссертантом и опубликованы в работе [133].

Легко видеть, что нет ни одного надежно зафиксированного случая, когда наблюдалась только рентгеновская вспышка или только падение Dst. Во всех таких случаях наблюдения были затруднены, так что мог иметь место и всплеск мерцаний. Будем далее рассматривать только надежно обнаруженные события.

Имеются три случая, когда всплеск мерцаний не сопровождался ни рентгеновской вспышкой, ни падением Dst. Такой всплеск мерцаний может быть вызван, например, областью взаимодействия потоков быстрого и медленного солнечного ветра (co-rotating interaction region, CIR). Три события, когда рентгеновская вспышка сопровождалась всплеском мерцаний, но не падением Dst, могли быть вызваны CME, не вызвавшими геомагнитных возмущений из-за

ориентации своего магнитного поля. Имеется два случая, когда вспышка сопровождалась падением Dst, но не всплеском мерцаний.

Первое из таких событий проявилось в рентгеновском диапазоне как вспышка класса M9.3 (2^h UT; 27.07.2011) и в уменьшении индекса Dst до -37 nT (23^h UT; 27.07.2011). Если рентгеновская вспышка и падение Dst действительно связаны, то скорость распространения возмущения составляла примерно 2000 км/с и возмущение достигло Земли менее чем за сутки. В таком случае фронт CME мог не пересечь лучи зрения на источники, находящиеся на оптимальных для наблюдения мерцаний элонгациях. Событие 13-15 марта 2012 г. отмечено вспышкой класса M7.9 13 марта с кульминацией в 18^h UT и падением Dst 15 марта в 21^h UT до -74 nT. Если вспышка и геомагнитное возмущение связаны с одним и тем же CME, остается открытым вопрос, почему этот CME не был зафиксирован по наблюдениям мерцаний. Имеется шесть случаев, когда всплеск мерцаний сопровождался падением Dst, но не рентгеновской вспышкой. Они могут быть связаны с безвспышечными CME, либо CIRs в районе Земли. Точное выяснение природы вышеописанных событий требует дополнительного исследования.

Девять событий, зарегистрированных всеми тремя способами одновременно, можно достаточно уверенно классифицировать как достигшие Земли CME. Интересно выяснить, присутствуют ли эти выбросы online-каталоге CME, наблюдаемых коронографом LASCO [153]. CME, обнаруженный по данным LASCO, отождествлялся с CME, обнаруженным в настоящей работе, если момент его первого появления в поле зрения LASCO отличался от момента кульминации соответствующей рентгеновской вспышки не более чем на час. Выяснилось, что из девяти рассматриваемых событий в online-каталоге [153] присутствуют восемь (кроме всплеска мерцаний, наблюдавшегося 10-11 июня 2012 г.). В каталоге приведены данные о скорости обнаруженных CME в поле зрения LASCO (linear speed). Всего с июля 2011 г. по июнь 2012 г. включительно на LASCO было обнаружено 2024 CME. Многие из них имеют одинаковую скорость, так что всего зарегистрировано 681 значение скорости. Можно

обратить внимание, что семь из восьми достигших Земли СМЕ, обнаруженных одновременно по данным настоящей работы и по наблюдениям LASCO, входят в 8% самых быстрых СМЕ из наблюдавшихся LASCO. Это может означать, насколько можно судить по такой узкой выборке, что высокая скорость вблизи Солнца является необходимым (хотя, видимо, и не достаточным) условием для того, чтобы СМЕ достиг Земли. Сведения о наблюдении некоторых из этих СМЕ содержатся также в работах [163 – 170].

В следующей главе для девяти обнаруженных СМЕ, достигших Земли, будут оценены средние скорости на участках «Солнце – Земля» и «Солнце – прицельная точка».

4.5. Выводы по главе 4

В годичной серии наблюдений 2011–2012 гг. использован метод обнаружения выбросов корональной массы, основанный на сравнении индекса мерцаний источника за текущий день наблюдений с индексом мерцаний за предыдущий день. Полученные результаты сопоставлены с данными о всплесках рентгеновского излучения Солнца и вариациях геомагнитного индекса Dst. Показано, что метод мерцаний позволяет зафиксировать подавляющую часть межпланетных возмущений, связанных с рентгеновскими вспышками класса M5.0 и выше, и является достаточно эффективным при исследовании выбросов корональной массы во внутренней гелиосфере. Можно ожидать, что использование метода мерцаний при широком охвате небесной сферы и достаточно плотной сетке источников позволит получить важную информацию о скоростях распространения и геометрии индивидуальных выбросов корональной массы. Такие возможности уже в ближайшем будущем даст модернизированный радиотелескоп БСА ФИАН, который в настоящее время имеет 96 лучей, охватывающих область склонений около 50° и, благодаря высокой чувствительности, позволяет наблюдать ежедневно до 5000 мерцающих источников.

Глава 5. Оценка скоростей достигших Земли выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний в 2011-2012 гг.

Кинематика СМЕ в настоящее время изучена не полностью. Знание кинематики выброса необходимо для понимания его динамики, которая связана с физическими характеристиками самого СМЕ и окружающего солнечного ветра. Таким образом, наблюдательные оценки скоростей СМЕ имеют научную ценность. С другой стороны, они имеют и практическую ценность, т.к. позволяют прогнозировать приход СМЕ на Землю и связанные с ним магнитные бури.

В этой главе излагаются результаты оценки скоростей девяти выбросов корональной массы, сопровождавшихся рентгеновскими вспышками на Солнце и геомагнитными возмущениями. Скорости, определенные по наблюдениям межпланетных мерцаний, сопоставляются со средними скоростями СМЕ между Солнцем и Землей. Изложенные результаты опубликованы в работе [171].

5.1. Способы оценки скоростей выбросов корональной массы

Скорости СМЕ могут быть оценены разными способами. По наблюдениям наземных и космических коронографов можно оценить скорость СМЕ вблизи Солнца. Из наблюдений определяются различные виды скоростей, связанные со сложным характером движения СМЕ, например скорость переднего края (the leading-edge speed) и скорость расширения (expansion speed). По ним можно определить радиальную скорость СМЕ, исходя из различных предположений о его форме [172]. Однако поведение скорости при удалении от Солнца $V = V(R)$ для разных СМЕ может быть различным, и по одной лишь скорости вблизи Солнца его предсказать нельзя. Скорость СМЕ вблизи орбиты Земли может быть непосредственно измерена космическим аппаратом как скорость частиц межпланетной плазмы [156 – 158]. Однако для сильных возмущений нужно

учитывать специфику работы приборов в условиях крайне неоднородной и нестационарной плазмы [158].

Средняя скорость СМЕ, достигшего Земли, может быть оценена по промежутку времени между его рождением и приходом на Землю. Момент рождения СМЕ может быть определен по моменту ассоциированной с СМЕ солнечной вспышки (если таковая имела место) или по наблюдениям коронографов. Момент прихода СМЕ на Землю может быть оценен по возмущению геомагнитного поля. Очевидно, что средняя скорость может быть оценена лишь после прихода выброса на Землю, поэтому использовать ее для прогноза времени такого прихода нельзя.

Существует несколько способов оценки скорости СМЕ по наблюдениям межпланетных мерцаний. Если СМЕ распространяется перпендикулярно к лучу зрения на радиоисточник, скорость может быть определена по спектру мощности межпланетных мерцаний [38 – 39]. Однако в остальных случаях оценка скорости по спектру мощности мерцаний дает заниженные результаты [131]. Кроме того, можно использовать взаимное расположение Земли, Солнца и мерцающих радиоисточников. В работе [30] возмущение было зафиксировано по всплеску мерцаний, наблюдавшемуся у многих радиоисточников несколько дней подряд. В каждый следующий день всплеск мерцаний наблюдался у источников, все более удаленных от Солнца. Путем сравнения данных наблюдений за разные дни была определена скорость возмущения.

Этот метод требует, однако, чтобы всплеск мерцаний радиоисточников наблюдался несколько дней подряд. Таким образом, он подходит лишь для достаточно медленных возмущений (скорость возмущения, исследованного в работе [30], составила $\sim 450\text{-}500$ км/с). Скорость СМЕ также можно оценить по моменту рождения СМЕ и моменту наблюдения источника, показавшего всплеск мерцаний. Если в наблюдениях проявляется всплеск мерцаний, вызванный СМЕ, значит, на момент наблюдения источника возмущение достигло луча зрения на источник. Минимальное расстояние, которое оно должно было для этого пройти,

равно $1a.e. \sin \varepsilon$, где ε – элонгация источника (рисунок 15). Поэтому скорость СМЕ можно оценить снизу как

$$V \geq V_{x-sc} = \frac{1a.e. \sin \varepsilon}{t}. \quad (5.1)$$

Здесь V – средняя скорость возмущения между короной и лучом зрения, V_{x-sc} («X-ray – scintillations») – нижняя оценка скорости возмущения, ε – элонгация источника, показавшего всплеск мерцаний, t – промежуток времени между рождением СМЕ и кульминацией источника.

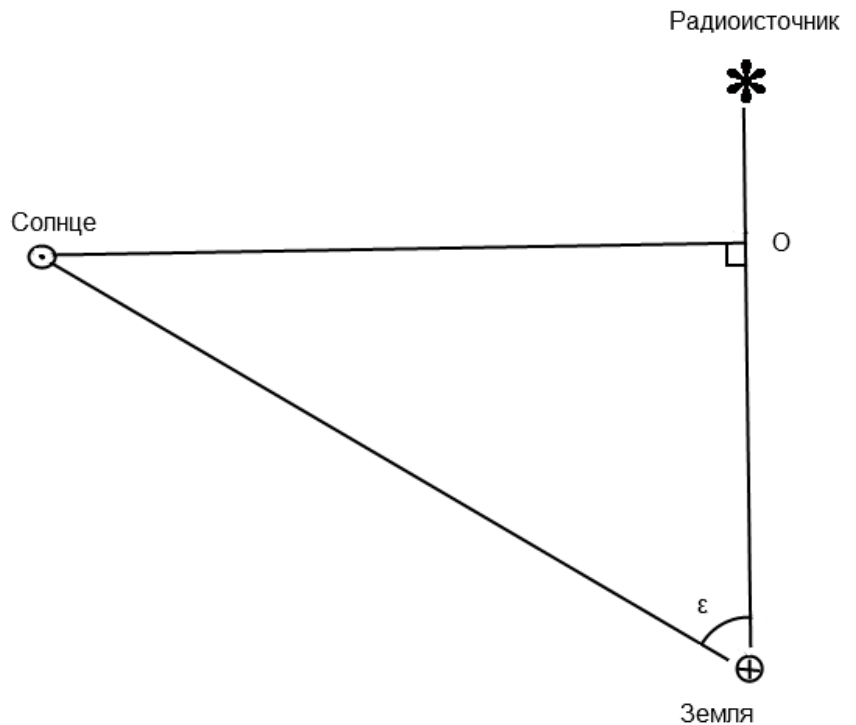


Рисунок 15. Схема, иллюстрирующая взаимное расположение Земли, Солнца и радиоисточника. Здесь ε – элонгация источника, O – прицельная точка.

Подобный метод использовался в работе [42] и работе [171], результаты которой излагаются ниже.

5.2. Методика оценки скоростей СМЕ по наблюдениям мерцаний в 2011-2012 гг.

В предыдущей главе было описано детектирование СМЕ по наблюдениям мерцающих источников на БСА ФИАН в 2011-2012 гг. Для девяти событий класса «X + Sct + Dst», получивших статус «надежные», были оценены скорости СМЕ. Во-первых, оценивалась средняя скорость выброса между Солнцем и Землей по формуле

$$V_{cp} = \frac{1 a. e.}{t_{Earth} - t_{Sun}}. \quad (5.2)$$

Здесь t_{Sun} – момент рождения СМЕ, t_{Earth} – момент прихода СМЕ на Землю.

За момент рождения СМЕ принимался момент кульминации вспышки в рентгеновском диапазоне [142], за момент прихода СМЕ на Землю – момент минимума резкого уменьшения геомагнитного индекса Dst [141].

Во-вторых, делалась нижняя оценка скорости по формуле (5.1). В-третьих, скорость оценивалась по спектру мощности мерцаний. Согласно работе [124] скорость движения модулирующих радиоизлучение неоднородностей для сферически симметричной геометрии может быть определена по формуле

$$V_{спектр} = 0.96 f_0 (1 a. e. \pi \lambda \cos \varepsilon)^{1/2}. \quad (5.3)$$

Здесь 0.96 – безразмерный коэффициент, f_0 – характерная частота излома спектра, λ – длина волна наблюдений, ε – элонгация источника.

5.3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим всплеск мерцаний 5 августа 2011 года. На рисунке 16 показано положение на небе источников, у которых индекс мерцаний увеличился в 1.5 и более раза.

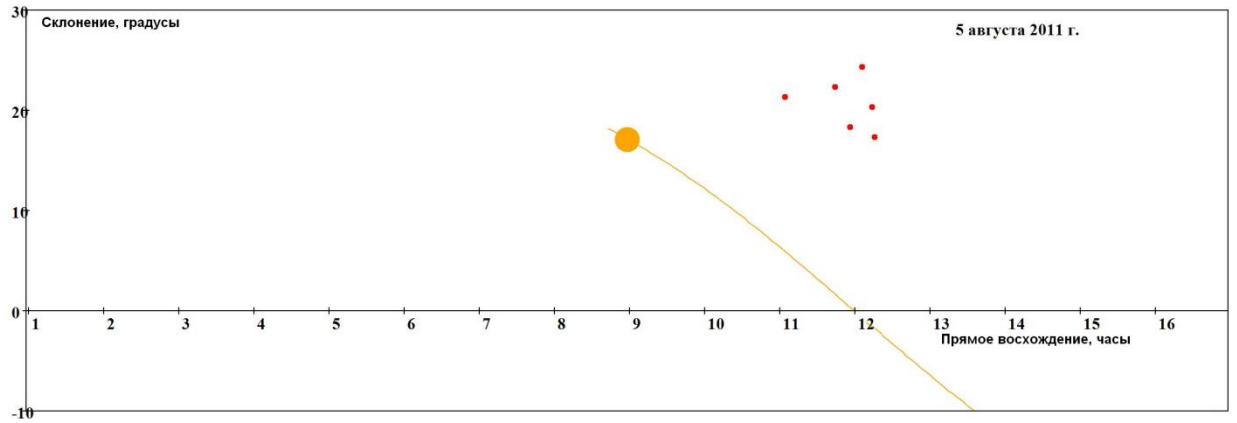


Рисунок 16. Распределение источников, показавших всплеск мерцаний 5 августа 2011 г., по наблюдаемой площадке. По оси абсцисс отложено прямое восхождение в часах, по оси ординат – склонение в градусах. Линией обозначена эклиптика, большим кругом – Солнце. Результаты диссертанта из работы [171].

Из рисунка видно, что картина усиления мерцаний несимметрична. Все источники, показавшие всплеск мерцаний, расположены по одну сторону от Солнца по прямому восхождению. Такая асимметрия наблюдалась для всех рассмотренных событий, кроме 21-24 октября 2011 г., 7-9 марта 2012 г. и 9-12 июня 2012 г. Вероятнее всего, такая картина говорит о несимметричном относительно Земли выбросе корональной массы. Для любых источников из наблюдаемой площадки, лежащих по одну сторону от Солнца (по прямому восхождению), при изменении элонгации от 30° до 80° множитель $1/t$ в формуле (5.1) меняется незначительно, поэтому зависимость оценки V_{x-sc} от элонгации близка к функции $\sin \varepsilon$. Увеличение индекса мерцаний происходило, как правило, на элонгациях $30^\circ - 60^\circ$, а функция $y = \sin \varepsilon$ на этом участке близка к линейной (рисунок 17.). Для источников, у которых всплеск мерцаний произошел на элонгациях больше 70° , видно, что скорость выходит на плато.

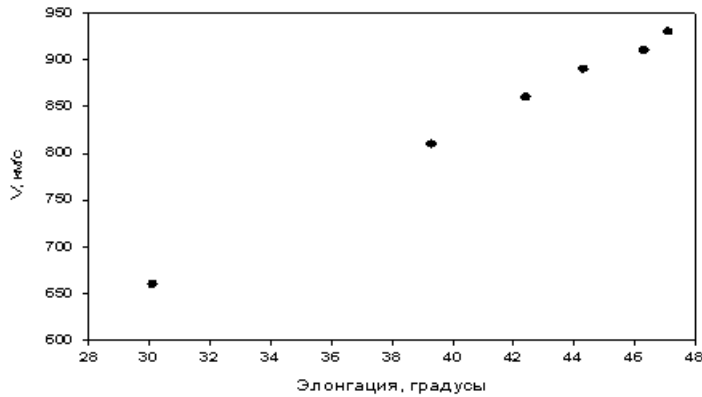


Рисунок 17. Зависимость оценки V_{x-sc} от элонгации для вспышки класса М9.3 4 августа и всплеска мерцаний 5 августа 2011 г. Данные о вспышках на Солнце, использованные для расчета V_{x-sc} , заимствованы из источника [142], данные о геомагнитной активности – из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [171].

Таким образом, если главной задачей является оценка ожидаемого времени прихода возмущения на Землю, целесообразно использовать максимальную скорость из оценок по формуле (5.1).

Если всплеску мерцаний и падению Dst предшествовало несколько вспышек, возникает вопрос, какая из вспышек связана с рождением СМЕ. Здесь использовалось два критерия. Во-первых, предполагалось, что средняя скорость СМЕ не должна быть меньше 400 км/с (характерная скорость медленного солнечного ветра) и больше 2500 км/с (экстремально высокая скорость для СМЕ [158]). Во-вторых, учитывался поток рентгеновского излучения. Из всех вспышек, подходящих по первому критерию, выбиралась вспышка с наибольшим рентгеновским потоком, а также все вспышки, рентгеновский поток которых составил не менее 30% от этого максимального. Для каждого исследованного возмущения определялся набор вспышек, которыми могло быть порождено это возмущение, и для каждой вспышки из этого набора делалась оценка скорости.

Результаты анализа представлены в таблице 2. В первой колонке таблицы приведена дата всплеска мерцаний; во второй – дата и время падения Dst до минимального значения, UT; в третьей («упреждение») – промежуток времени между наблюдением всплеска мерцаний источника и падением Dst до минимального значения; в четвертой – класс по потоку рентгеновского излучения, дата и время по UT вспышки, ассоциированной с СМЕ; в пятой (V_{cp}) – оценка скорости по формуле (5.2) (средняя скорость возмущения); в шестой (V_{x-cs}) – оценка скорости по формуле (5.1); в седьмой ($V_{спектр}$) – оценка скорости по спектру мощности, усредненная по всем источникам, показавшим данный всплеск мерцаний; в восьмой колонке приведена оценка времени прихода возмущения (по UT), основанная на оценке скорости V_{x-cs} .

Таблица 2. Оценки скоростей СМЕ с июля 2011 по июнь 2012 гг. Данные о вспышках на Солнце заимствованы из источника [142], данные о геомагнитной активности – из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [171].

дата всплеска мерцаний	дата и время падения Dst, UT	упреждение	Класс, дата и время вспышки, UT	$V_{ср}$, км/с	$V_{x-сc}$, км/с	Вспектр, км/с	Оценка времени прихода возмущения, UT
05.08.2011	06.08.2011; 4:00	15-16 ч.	M6.0; 03.08.2011;13:48	670	650	260	06.08.2011; 6:00
			M9.3; 04.08.2011;03:57	860	930		06.08.2011; 1:00
26.09.2011	27.09.2011; 0:00	10,5-13 ч.	X1.9; 24.09.2011 09:40	670	720	280	26.09.2011; 20:00
			M7.1; 24.09.2011 13:20	710	780		26.09.2011; 19:00
			M5.8; 24.09.2011 20:36	810	910		26.09.2011; 18:00
24.10.2011	25.10.2011; 2:00	15-20 ч.	M1.3; 21.10.2011 13:00	490	560	340	24.10.2011; 15:00
			M1.3; 22.10.2011 11:10	660	850		24.10.2011; 12:00
30.12.2011	30.12.2011; 19:00	12,5-14,5 ч.	M2.3; 26.12.2011 20:30	440	510	270	30.12.2011; 6:00
06.03.2012	07.03.2012; 10:00	19,5-21,5 ч.	X1.1; 05.03.2012 04:09	770	1170	300	06.03.2012; 16:00
08.03.2012	09.03.2012; 9:00	21-25 ч.	X5.4; 07.03.2012 00:24	730	810	360	09.03.2012; 4:00
			X1.3; 07.03.2012 01:14	750	830		09.03.2012; 3:00
10.03.2012	12.03.2012; 17:00	53-54 ч.	M6.3; 09.03.2012 03:53	490	890	420	11.03.2012; 3:00
10-11.06.2013	12.06.2012; 2:00	20-37 ч.	M1.9; 09.06.2012 11:32	670	1300	320	10.06.2012; 20:00
			M1.8; 09.06.2012 16:53	730	1640		10.06.2012 ;18:00
17.06.2012	17.06.2012; 14:00	8,5-9,5 ч.	M1.2; 13.06.2012 13:17	430	450	440	17.06.2012; 10:00
			M1.9; 14.06.2012 14:35	580	640		17.06.2012; 8:00

Для наглядности данные пятой и шестой колонок таблицы 2 приведены на рисунке 18.

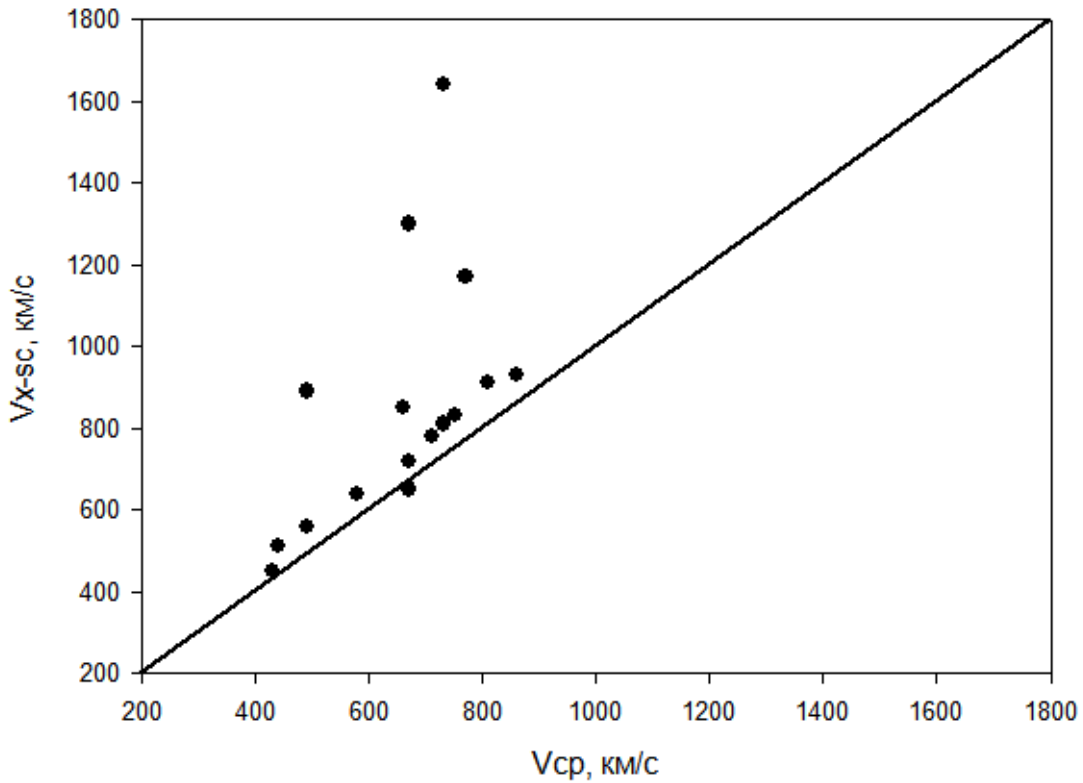


Рисунок 18. Сравнение оценки V_{x-sc} со средней скоростью возмущения V_{cp} для всех событий, представленных в таблице 2. Данные о вспышках на Солнце, использованные для расчета V_{x-sc} и V_{cp} , заимствованы из источника [142], данные о геомагнитной активности – из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [171].

Легко видеть, что для шести из девяти событий скорость V_{x-sc} отличается от средней скорости возмущения не более чем на 16%. Наибольшее отклонение (94% и 125% средней скорости по разным вспышкам) демонстрирует событие 9-12 июня 2012 г. Можно обратить внимание, что по средней скорости возмущения это событие не выделяется среди других событий, а вот оценки V_{x-sc} самые высокие во всей выборке. Природа такого расхождения требует дополнительного исследования.

Оценка времени прихода возмущения, основанная на оценке скорости V_{x-sc} , для шести событий отличается от реально зафиксированного момента минимума Dst не более чем на 15 ч., в том числе для трех событий – не более чем на 6 ч. Также легко видеть, что во всех событиях, кроме одного, оценка скорости V_{x-sc} больше средней скорости. Это может быть связано с тем, что скорость СМЕ в точке просвечивания выше средней по всему пути скорости за счет замедления выброса. Принципиальная трудность состоит в том, что в большинстве случаев есть несколько вспышек, которые можно принять за момент рождения СМЕ. Оценки скоростей одного и того же СМЕ по разным вспышкам для некоторых событий отличаются в полтора раза.

Оценка скорости по спектру мощности почти во всех случаях в два и более раза ниже других оценок. Вероятно, это связано с тем, что при наличии возмущения геометрия среды сильно отличается от сферически симметричной и, кроме того, с тем, что скорость плазмы в возмущенном потоке не перпендикулярна лучу зрения на источник [131]. Таким образом, для большинства возмущений оценка скорости распространения, полученная по излому спектра мощности мерцаний, не является надежной.

5.4. Выводы по главе 5

Для девяти достигших Земли выбросов корональной массы, произошедших в период с июля 2011 г. по июнь 2012 г., оценена средняя скорость на участках «Солнце – Земля» и «Солнце – прицельная точка». Скорость на участках «Солнце – Земля» оценивалась по промежутку времени между рентгеновской вспышкой, ассоциированной с рождением СМЕ, и падением индекса Dst. Скорость на участке «Солнце – прицельная точка» оценивалась по промежутку времени между рентгеновской вспышкой, ассоциированной с рождением СМЕ, и всплеском мерцаний. Показано, что в двух третях случаев обе оценки хорошо согласуются между собой, что позволяет предсказывать моменты прихода возмущений к Земле.

Заключение

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию радиоисточников и крупномасштабной структуры солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний вблизи минимума и в фазе роста 23/24 цикла солнечной активности. В работе использованы наблюдения, выполненные в 2007-2012 гг. на радиотелескопе БСА Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН.

По наблюдательным данным 2007-2011 гг. оценивалась средняя дисперсия мерцаний статистического ансамбля слабых мерцающих радиоисточников. Построена радиальная зависимость уровня межпланетных мерцаний. Показано, что в 2008-2010 гг., пришедшихся на минимум 23/24 цикла солнечной активности, радиальная зависимость уровня межпланетных мерцаний была сильно подавлена по сравнению с 2007 г., пришедшимся на фазу спада 23 цикла, и 2011 г., пришедшимся на фазу роста 24 цикла. Такой эффект не согласуется со сферически симметричной моделью солнечного ветра, согласно которой основной вклад в мерцания дает турбулентная плазма вблизи прицельной точки. Наблюдаемый эффект можно интерпретировать как влияние гелиосферного токового слоя. Этот слой обладает повышенным, по сравнению с окружающим солнечным ветром, уровнем турбулентности и просвечивается источниками на всех элонгациях. Поэтому вклад гелиосферного токового слоя должен ослаблять зависимость уровня мерцаний от элонгации, что и наблюдается.

По наблюдениям 2011 г. впервые апробирован метод оценки углового размера просвечивающего источника по наблюдениям насыщенных мерцаний. Для источника V0531+194 получена оценка углового размера в $0.24'' \pm 0.05''$, что хорошо согласуется с известными из литературы оценками углового размера этого источника на высоких частотах.

В годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. по всплескам мерцаний детектировались выбросы корональной массы. Полученные данные сопоставлялись с информацией о рентгеновских вспышках на Солнце и

геомагнитных возмущениях. Показано, что метод мерцаний позволяет детектировать подавляющую часть выбросов, связанных с рентгеновскими вспышками класса M5.0 и выше.

Для девяти обнаруженных в этих наблюдениях выбросов, достигших Земли, оценивалась скорость по промежутку времени между вспышкой, ассоциированной с рождением СМЕ, и всплеском мерцаний. Показано, что в большинстве случаев такая оценка близка к средней скорости возмущения на участке «Солнце – Земля», что дает возможность предсказывать момент прихода выброса к Земле.

В связи с модернизацией радиотелескопа БСА ФИАН открываются новые перспективы развития исследований, отраженных в диссертации. Увеличение количества лучей в диаграмме направленности позволяет наблюдать больше одиночных мерцающих источников. У источников, показывающих заметные мерцания в режиме насыщения, можно будет оценить угловой размер методом, описанным в данной работе. Кроме того, наблюдение более обширной сетки источников позволит эффективнее отслеживать выбросы корональной массы. Еще перспективнее использование для этой цели статистического ансамбля слабых мерцающих источников. Предполагается измерять уровень флуктуаций плотности потока в янских на интервале в 2-3 минуты. Индикатором СМЕ может служить резкое повышение этого уровня флуктуаций. Для этого необходимо создать систему ежедневной калибровки радиотелескопа, чтобы ежедневно знать текущее отношение единицы аналого-цифрового преобразователя к янскому. Эта задача в настоящее время решается. Калибровка телескопа позволит создать также каталог мерцающих источников с указанием плотности потока мерцающего компонента, который будет иметь несомненную научную ценность. Ожидается, что модернизированный телескоп БСА позволит получить еще целый ряд интересных результатов.

Список использованных сокращений

АКЦ – Астрокосмический центр.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

БСА – Большая сканирующая антенна (радиотелескоп в Пушинской радиоастрономической обсерватории).

ПРАО – Пушинская радиоастрономическая обсерватория.

ФИАН – Физический институт Российской академии наук.

CIR – co-rotating interaction region (область, где поток быстрого солнечного ветра догоняет поток медленного).

CME – coronal mass ejection (выброс корональной массы).

Dst – Disturbance storm time index (индекс, характеризующий интенсивность возмущений геомагнитного поля).

GOES – Geostationary operational environmental satellite (космический аппарат для исследования солнечной активности, США).

IPS – interplanetary scintillation (межпланетные мерцания).

K_p – квазилогарифмический планетарный индекс (индекс, характеризующий интенсивность возмущений геомагнитного поля).

LASCO – Large angle and spectrometric coronagraph (коронограф на борту космического аппарата SOHO).

NED – NASA/IPAC extragalactic database (база данных по внегалактическим объектам).

SMEI – Solar mass ejection imager (прибор на борту космического аппарата Coriolis).

SOHO – Solar and Heliospheric Observatory (космический аппарат для исследования Солнца, совместный проект NASA и Европейского космического агентства).

STEREO – Solar-terrestrial relations observatory (космический аппарат для исследования солнечной активности, совместный проект NASA и Европейского космического агентства).

UT – Universal time (всемирное время).

VLA – Very large array (система апертурного синтеза, США).

Использованная литература

1. Ahnert P. Der Komet 1942 g (Whipple-Fedtke). Mit 6 Abbildungen // Zeitschrift für Astrophysik. – 1943. – V. 22. – P. 288 – 309.
2. Hoffmeister C. Physikalische Untersuchungen an Kometen. I. Die Beziehungen des primären Schweifstrahls zum Radiusvektor. Mit 2 Abbildungen // Zeitschrift für Astrophysik. – 1943. – V. 22. – P. 265 – 287.
3. Biermann L. Kometenschweife und solare Korpuskularstrahlung // Zeitschrift für Astrophysik. – 1951. – V. 29. – P. 274 – 286.
4. Biermann L. Solar corpuscular radiation and the interplanetary gas // The Observatory. – 1957. – V. 77. – P. 109 – 110.
5. Всехсвятский С. К., Никольский Г. М., Пономарев Е. А., Чередниченко Е. И. К вопросу о корпускулярном излучении Солнца // Астрономический журнал. – 1955. – Т 32. – С. 165 – 176.
6. Chapman S. Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere // Smithsonian Contribution to Astrophysics. – 1957. – V. 2. – P. 1 – 11.
7. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д., Рыбчинский Р. Е. Изучение межпланетного ионизационного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете. // Доклады академии наук СССР. – 1960. – Т. 131 – С. 1301.
8. Snyder C. W., Neugebauer M. Interplanetary solar wind measurements by Mariner 2. // Space Research. – 1964. – V. 4. – P. 89 – 113.
9. Neugebauer M., Snyder C. W. Mariner 2 observations of the solar wind, 1. Average properties. // Journal of Geophysical Research. – 1966. – V. 71. – P. 4469 – 4489.
10. Neugebauer M., Snyder C. W. Mariner 2 observations of the solar wind, 2. Relation of plasma properties to the magnetic field. // Journal of Geophysical Research. – 1967. – V. 72. – P. 1832 – 1828.

11. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. – М.: Мир, 1976.
12. Брандт Дж. Солнечный ветер. – М.: Мир, 1973.
13. Коваленко В. А., Молодых С. И. Энергетический баланс открытых областей короны и солнечного ветра. // Письма в Астрономический журнал. – 1978. – Т. 4. – С. 316 – 319.
14. Proelss G. W. Physics of the Earth's space environment / Proelss G. W. – Berlin: Springer, 2004.
15. Чертков А. Д. Солнечный ветер и внутреннее строение Солнца – М: Наука, 1985.
16. Виткевич В. В. Новый метод исследования солнечной короны // Доклады академии наук СССР. – 1951. – Т. 77. – С. 585 – 588.
17. Виткевич В. В. Результаты наблюдений рассеяния радиоволн на неоднородностях солнечной короны // Доклады академии наук СССР. – 1955. – Т. 101. – С. 429.
18. Бабий В. И., Виткевич В. В., Власов В. И. и др. Сверхкорона Солнца по наблюдениям 1959-1963 гг. // Астрономический журнал. – 1965. – Т. 42. – С. 107 – 116.
19. Hewish A., Scott P. F., Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources // Nature. – 1964. – V. 203. – P. 214 – 217.
20. Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и аэрономия. – 1979. – Т. 19. – С. 401 – 424.
21. Gapper G. R., Hewish A., Purvis A., Duffett&Smith P. J. Observing interplanetary disturbances from the ground // Nature. – 1982. – V. 296. – P. 633 – 636.
22. Vitkevich V. V. Solar-Terr. Symposium, Dordrecht, D. Reidel, 1971. P. 49.
23. Rickett B. J. Power spectrum of density irregularities in the solar wind plasma // Journal of Geophysical Research. – 1973. – V. 78. – P. 1543.

24. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические наблюдения солнечного ветра // *Астрономический циркуляр*. – 1966. – Т. 396. – С. 1 – 4.
25. Dennison P. A., Hewish A. The Solar Wind outside the Plane of the Ecliptic // *Nature*. – 1967. – V. 213. – P. 343 – 346.
26. Slee O. B., Higgins C. S. The solar wind and Jovian decametric radio emission // *Australian Journal of Physics*. – 1968. – V. 21. – P. 341.
27. Hewish A., Symonds M. D. Radio investigation of the solar plasma // *Planetary and Space Science*. – 1969. – V. 17. – P. 313 – 320.
28. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические исследования дрейфа неоднородностей межпланетной плазмы // *Астрономический журнал*. – 1969. – Т. 46. – С. 851 – 861.
29. Виткевич В. В., Власов В. И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967-1969 гг. // *Астрономический журнал*. – 1972. – Т. 49. – С. 595.
30. Власов В. И. Радиоизображения межпланетной турбулентной плазмы. // *Астрономический журнал*. – 1979. – Т. 56. – С. 96 – 105.
31. Власов В. И. Межпланетные ударные волны по наблюдениям мерцаний радиоисточников // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1981. – Т. 21. – С. 927 – 929.
32. Власов В. И. Радиоастрономические наблюдения ударной волны от вспышки 18 августа 1979 года // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1986. – Т. 26. – С. 182 – 186.
33. Власов В. И. Скорости межпланетных ударных волн по радиоастрономическим данным // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1988. – Т. 28. – С. 1 – 5.
34. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний. Теория. // *Астрономический журнал*. – 1978. – Т. 55. – С. 411 – 418.
35. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний. Наблюдения // *Астрономический журнал*. – 1979. – Т. 56. – С. 613 – 622.

36. Manoharan P. K., Ananthkrishnan S. Determination of solar wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillations // *Monthly notices of Royal astronomy Society*. – 1990. – V. 244. – P. 619 – 695.
37. Manoharan P. K., Kojima M., Misawa H. The spectrum of electron density fluctuations in the solar wind and its variations with solar wind speed // *Journal of geophysical research*. – 1994. – V. 99. – P. 23, 411 – 23, 420.
38. Manoharan P. K. Interplanetary disturbances and their association with large-scale magnetic field on the Sun // *Bulletin of the Astronomical Society of India*. – 1998. – V. 26. – P 211 – 217.
39. Gothoskar P., Rao. A. P. On observing mass ejections in the interplanetary medium // *Solar Physics*. – 1999. – V. 185. – P. 361 – 390.
40. Chashei I. V., Shishov V. I., Tyul'bashev S. A. et al. Results of IPS Observations in the Period Near Solar Activity Minimum // *Solar Physics*. – 2013. – V. 285. – P. 141 – 149.
41. Hardwick S. A., Bisi M. M., Davies, J. A. et al. Observations of Rapid Velocity Variations in the Slow Solar Wind. // *Solar Physics*. – 2013. – V. 285. – P. 111 – 126.
42. Iju T., Tokumaru M., Fujiki K. Radial speed evolution of interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 // *Solar Physics*. – 2013. – V. 288. – P. 331 – 353.
43. Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазара 3С 48 в минимуме солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2013. – Т. 90. – С. 639 – 647.
44. Ефимов А. И., Лотова Н. А. О гелиоширотной зависимости скорости солнечного ветра // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1975. – Т. 15. – С. 731-732.
45. Власов В. И. Межпланетная плазма в 11-летнем цикле солнечной активности. / Власов В. И. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1983. – Т. 23. – С. 475.
46. Balogh A., Smith E. J., Tsurutani B. T. et al. The heliospheric magnetic field over the south polar region of the Sun // *Science*. – 1995. – V. 268. – P. 1007 – 1010.

47. McComas D. J., Elliott H. A., Schwadron N.A. et al. The three-dimensional solar wind around solar maximum // *Geophysical Research Letters*. – 2003. – V. 30. – P. 1517 – 1520.
48. Cohen M. H., Clark B. C., Jauncey D. L. Angular Size of 3C 273B // *The Astrophysical Journal*. – 1967. – V. 147. – P. 449 – 456.
49. Nolte J. T., Kriger A. S. et al. Coronal holes as sources of solar wind. // *Solar Physics*. – 1976. – V. 46. – P. 303 – 322.
50. Шугай Ю. С., Веселовский И. С., Трищенко Л. Д. Исследование корреляционных связей между площадью корональных дыр, скоростью солнечного ветра и локальными магнитными индексами в канадском регионе на спаде 23-го цикла солнечной активности. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2009. – Т. 49. – С. 435 – 445.
51. Чашей И. В. Корона и солнечный ветер в квазидипольном магнитном поле // *Астрономический журнал*. – 1992. – Т. 69. – С. 192.
52. Pisanko Yu. V. The Polar Solar Wind: a Linear, Force-Free Field, 3-D MHD Model // *Solar Physics*. – 1997. – V. 172. – P. 345 – 352.
53. Pisanko Yu. V. The Polar Solar Wind: an Additional Acceleration due to the Rotation of the Magnetic Sun. // *The Corona and Solar Wind Near Minimum Activity*. held at Institute of Theoretical Astrophysics. University of Oslo, Norway, 17-20 June, 1997. – P. 605 – 608.
54. Веселовский И. С., Шугай Ю. С. Высокоскоростные потоки солнечного ветра вблизи орбиты Земли и их источники на Солнце по стереоскопическим наблюдениям в минимуме 23-го цикла. // *Космические исследования*. – 2010. – Т. 48. – С. 33 – 42.
55. Pneuman G. W., Kopp R. A. Gas-magnetic field interaction in the solar corona // *Solar Physics*. – 1971. – V. 18. – P. 258 – 270.
56. Steinolfson R. S., Suess S. T., Wu S. T. The steady global corona // *The Astrophysical Journal*. – 1982. – V. 255 (2). – P. 730 – 742.

57. Подгорный И. М., Подгорный А. И., Минами Ш., Моримото М. МГД-моделирование гелиосферного токового слоя // *Астрономический журнал*. – 2004. – Т. 81. – С. 475 – 480.
58. Веселовский И. С. Электрические токи и магнитные поля в короне Солнца и гелиосфере // *Солнечно-земная физика*. – 2004. – Вып. 6. – С. 119 – 122.
59. Chapman S. Interplanetary Space and the Earth's Outermost Atmosphere. // *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1959. – V. 253. – P. 462 – 481.
60. Behr A., Siedentopf H. Untersuchungen über Zodiakallicht und Gegenschein nach lichtelektrischen Messungen auf dem Jungfrauoch. // *Zeitschrift für Astrophysik*. – 1953. – V. 32. – P. 19 – 50.
61. Parker E. N. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. // *The Astrophysical Journal*. – 1958. – V. 128. – P. 664 – 675.
62. Parker E. N. Interaction of the Solar Wind with the Geomagnetic Field // *Physics of Fluids*. – 1958. – V. 1. – P. 171 – 187.
63. Parker E. N. Dynamical Theory of the Solar Wind. // *Space Science Reviews*. – 1965. – V. 4. – P. 666 – 708.
64. Carovillano R. L., King J. H. On the Solutions of Parker's Hydrodynamic Theory of Solar and Stellar Winds. // *The Astrophysical Journal*. – 1965. – V. 141. – P. 526.
65. Noble L. M., Scarf F. L. Conductive Heating of the Solar Wind. I. // *The Astrophysical Journal*. – 1963. – V. 138. – P. 1169.
66. Whang Y. C., Liu C. K., Chang C. C. Viscous Model of the Solar Wind. // *The Astrophysical Journal*. – 1966. – V. 145. – P. 255.
67. Meyer F., Schmidt H. U. Einfluß der Viskosität auf den Sonnenwind. // *Mitt d. Astron. Gesell.* – 1966. – V. 21. – P. 96.
68. Meyer F., Schmidt H. U. Berichtigung zum Referat "Einfluß der Viskosität auf den Sonnenwind" in *Mitteilungen der Astron. Ges.* 1966. V. 21. P. 96. // *Mitt d. Astron. Gesell.* – 1968. – V. 25. – P. 228.
69. Axford W. I., Dessler A. J., Gottlieb B. Termination of Solar Wind and Solar Magnetic Field. // *The Astrophysical Journal*. – 1963. – V. 137. – P. 1268.

70. Weber E. J., Davis L. The Angular Momentum of the Solar Wind. // The Astrophysical Journal. – 1967. – V. 148. – P. 217 – 227.
71. Modisette J. L. Solar Wind Induced Torque on the Sun. // Journal of Geophysical Research. – 1967. – V. 72. – P. 1521.
72. Brandt J. C., Wolff C., Cassinelli J. P. Interplanetary Gas. XVI. a Calculation of the Angular Momentum of the Solar Wind. // The Astrophysical Journal. – 1969. – V. 156. – P. 1117.
73. Schubert G., Coleman P. J. The Angular Momentum of the Solar Wind // The Astrophysical Journal. – 1968. – V. 153 – P. 943.
74. Кутузов А. С., Чашей И. В. О теплопроводной модели солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – С. 36.
75. Axford W. I., Leer E., Skadron G. The acceleration of cosmic rays by shock waves // International Cosmic Ray Conference, 15th, Plovdiv, Bulgaria, August 13-26, 1977, Conference Papers. – 1977. – V. 11. – P. 132 – 137.
76. Steinolfson R. S., Suess S. T., Wu S. T. The steady global corona. // The Astrophysical Journal. – 1982. – V. 255. – P. 730 – 742.
77. Hollweg J. V. Some physical processes in the solar wind. // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1978. – V. 16. – P. 689 – 720.
78. Коваленко В. А. Солнечный ветер. – М.: Наука, 1983.
79. Чашей И. В., Шишов В. И. Формирование потоков массы и энергии солнечного ветра в модели с волновым источником. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1987. – Т. 27. – С. 705.
80. Чашей И. В., Шишов В. И. О потоке энергии МГД-волн, выходящем в корону Солнца. // Астрономический журнал. – 1987. – Т. 64. – С. 398.
81. Чашей И. В., Шишов В. И. Самосогласованная модель спокойной солнечной короны с волновым источником энергии // Астрономический журнал. – 1988. – Т. 65. – С. 157.
82. Sandbaek O., Leer E. Coronal Heating and Solar Wind Energy Balance // The Astrophysical Journal. – 1995. – V. 454. – P. 486.

83. Кутузов А. С., Чашей И. В. Формирование короны и ускорение солнечного ветра волновыми источниками энергии-импульса // Геомагнетизм и аэрономия. – 1998. – Т. 38. – С. 1.
84. Veselovsky I. S., Lukashenko A. T. Model of the magnetic field in the inner heliosphere with regard to radial field strength leveling in the solar corona // Solar System Research. – 2012. – V. 46. – P. 149 – 159.
85. Веселовский И. С. Происхождение солнечного ветра: астрофизический и плазменно-физический аспекты проблемы. // Солнечно-земная физика. – 2008. – Т. 1. – С. 93 – 98.
86. Coleman P. Turbulence, viscosity and dissipation in the solar wind plasma // The Astrophysical Journal. – 1968. – V. 153. – P. 371.
87. Siscoe G. L., Davis L. J., Coleman P. J. et al. Power spectra and discontinuities in the interplanetary magnetic field: Mariner 4 // Journal of Geophysical Research. – 1968. – V. 73. – P. 61.
88. Denskat K. U., Beiroth H. J., Neubauer F. M. Interplanetary magnetic field power spectra with frequencies from 2.4×10^{-5} Hz to 470 Hz from Helios-observations during solar minimum conditions // Journal of Geophysics. – 1983. – V. 54. – P. 60 – 67.
89. Denskat K. U., Neubauer F. M. Statistical properties of low frequency magnetic field fluctuations in the solar wind from 0.29 to 1.0 AU during solar minimum conditions: Helios-1 and Helios-2 // Journal of Geophysical Research. – 1982. – V. 87. – P. 2215 – 2223.
90. Marsch E., Tu C.-Y. Dynamics of correlation functions with Elsasser variables for inhomogeneous MHD turbulence // Journal of Plasma Physics. – 1989. – V. 41. – P. 479 – 491.
91. Intrilligator D. S. Direct observations of higher frequency density fluctuations in the interplanetary plasma // Astrophysical Journal. – 1975. – V.196. – P. 879 – 882.

92. Unti T. W. J., Neugebauer M., Goldstein B. E. Direct measurements of solar wind fluctuations between 0.0048 and 13.3 Hz // *The Astrophysical Journal*. – 1973. – V. 180. – P. 590 – 598.
93. Poletto, G. Suess S. Global picture of CMEs in the inner heliosphere // *The Sun and the heliosphere as an integrated system / Astrophys. Space Sci. Libr. / G. Poletto, S. Suess (eds.)*. – Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2004. – V. 317. – P. 201.
94. Vourlidas A., Howard R. A., Esfandiari E. et al. Comprehensive analysis of coronal mass ejection mass and energy properties over a full solar cycle // *The Astrophysical Journal*. – 2010. – V. 722. – P. 1522 – 1538.
95. Guedes M. R. G., Pereira E. S., Cecatto J. R. Wavelet analysis of CME, X-ray flare, and sunspot series // *Astronomy & Astrophysics*. – 2015. – V. 573. – P. 10 – 20.
96. Gao P.-X., Li K.-J. Speed distributions of CMEs in cycle 23 at low and high latitudes // *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*. – 2008. – V. 8. – P. 146-152.
97. Shanmugaraju A., Moon Y.-J., Cho K.-S. et al. Quasi-periodic oscillations in lasco coronal mass ejection speeds // *The Astrophysical Journal*. – 2010. – V. 708. – P. 450 – 455.
98. Harrison R. A. The nature of solar flares associated with coronal mass ejection // *Astronomy and Astrophysics*. – 1995. – V. 304. – P. 585.
99. Веселовский А. В., Прохоров А. В. Статистические распределения и классификация рентгеновских вспышек по их длительности на Солнце // *Астрономический вестник*. – 2008. – Т. 2. – С. 186 – 192.
100. Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S. et al. Visibility of coronal mass ejections as a function of flare location and intensity // *Journal of Geophysical Research*. 2005. – V. 110 – A12S05.
101. Youssef M. On the relation between the CMEs and the solar flares // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. – 2012. – V. 1. – P. 172 – 178.

102. St. Cyr O. C., Webb D. F. Activity associated with coronal mass ejections at solar minimum - SMM observations from 1984-1986 // *Solar Physics*. – 1991. – V. 136. – P. 379 – 394.
103. Dryer M. Comments on the Origins of Coronal Mass Ejections // *Solar Physics*. – 1996. – V. 169. – P. 421 – 429.
104. Hundhausen A. J. Coronal Mass Ejections // *The many faces of the Sun: A summary of the results from NASA's Solar Maximum Mission* / Eds. K.T. Strong et al. – N. Y.: Springer, 1999. – P. 143.
105. Harrison R. A. Coronal transients and their relation to solar flares // *Advances in Space Research*. – 1991. – V. 11. – P. 25 – 36.
106. Michalek G. Two types of flare-associated coronal mass ejections // *Astronomy & Astrophysics*. – 2009. – V. 494. – P. 263 – 268.
107. Шугай Ю. С., Веселовский И. С., Персианцев И. Г. Исследование связи крупномасштабных процессов на Солнце и с развитием корональных выбросов масс и солнечных вспышек. // *Солнечно-земная физика*. – 2008. – Т. 1. – С. 105 – 106.
108. Yermolaev Y. I., Nikolaeva N. S., Lodkina I. G., Yermolaev M. Y. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – V. – 117. – A00L07.
109. 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 // *Journal of geophysical research*. – 2007. – V. 112. – A10102.
110. Richardson I. G., Cane H. V. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // *J. Space Weather Space Clim*. – 2012. – V. 2. – A01.
111. Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S. et al. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections // *Journal of geophysical research*. – 2001. – V. 106. – P. 29, 207 – 209, 217d.

112. Schwenn R., Dal Lago A., Huttunen E., Gonzalez W. D. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth // *Annales Geophysicae*. – 2005. – V. 23. P. 1033 – 1059.
113. Kim K.-H., Moon Y.-J., Cho K.-S. Prediction of the 1-AU arrival times of CME-associated interplanetary shocks: Evaluation of an empirical interplanetary shock propagation model // *Journal of geophysical research*. – 2007. – V. – 112. – A05104.
114. Kim R.-S., Cho K.-S., Moon Y.-J. et al. An empirical model for prediction of geomagnetic storms using initially observed CME parameters at the Sun // *Journal of geophysical research*. – 2010. – V. 115. – A12108.
115. Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Зеленого Л. М., Веселовского И. С. В 2 т. – М.: Физматлит, 2008.
116. Писанко Ю. В. Солнечный ветер – М, 2011.
117. Chen P. F. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis. // *Living Review Solar Physics*. – 2011. – V. 8. – P. 1 – 92.
118. Webb D. F. Coronal Mass Ejections: Observations. // *Living Review Solar Physics*. – 2012. – V. 9. – P. 3 – 85.
119. Chandrasekhar S. A statistical basis for the theory of stellar scintillation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1952. – V. 112. – P. 475.
120. Salpeter E. E. Interplanetary Scintillations. I. Theory // *Astrophysical Journal*. 1967. – V. 147. – P. 433.
121. Шишов В. И. К вопросу о флуктуациях амплитуды при распространении электромагнитных волн в средах со случайными характеристиками // *Труды ФИАН*. – 1967. – Т. 38. – С. 171 – 176.
122. Шишов В. И. К теории распространения волн в случайных средах // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. – 1968. – Т. 11. – С. 866 – 875.
123. Гочелашвили К. С., Шишов В. И. Волны в случайно-неоднородных средах. – М.: ВИНТИ, 1981.
124. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада

вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51. – С. 1 – 6.

125. Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Субаев И. А., Чашей И. В. Наблюдения межпланетных и ионосферных мерцаний ансамбля радиоисточников в режиме мониторинга. // *Астрономический вестник*. – 2008. – Т.42. – С. 363 – 372.

126. Чашей И. В., Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Глянцев А. В., Субаев И. А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности // *Космические исследования*. – 2013. – Т. 51. С. 28 – 34.

127. Виткевич В. В., Илясов Ю. П., Кутузов С. М. и др. Антенно-аппаратурный комплекс БСА ФИАН // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. – 1976. – Т. 19. – С. 1595 – 1606.

128. Кутузов С. М. Азаренков Ю. И., Алексеев И. А и др. Перестройка радиотелескопа БСА ФИАН в диапазоне 109-113 МГц // *Труды ФИАН*. – 2000. – Т. 229. – С. 3.

129. Бутенко А. В. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. Кандидаты в гигантские радиогалактики на склонениях от 3.5° до 12° . // *Астрономический журнал*. – 2013. – Т. 90. – С. 3 – 9.

130. Орешко В. В., Латышев Г. А., Алексеев И. А. и др. Новая многолучевая диаграмма направленности радиотелескопа БСА ФИАН // *Труды Института прикладной астрономии РАН*. – 2012. – № 24. – С. 80 – 86.

131. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2015. – Т. 92. – С. 38 – 45.

132. Артюх В. С., Шишов В. И. Статистический анализ мерцающих радиоисточников. // *Астрономический журнал*. – 1982. – Т.59. – С. 896 – 902.

133. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. О детектировании выбросов корональной массы в межпланетной среде по

наблюдениям мерцаний радиоисточников. // *Астрономический журнал*. – 2014. – Т. 91. – С. 713 – 719.

134. Артюх В. С., Тюльбашев С. А. Обработка наблюдений обзора мерцающих радиоисточников. // *Астрономический журнал*. – 1996. – Т. 73. – С. 669 – 676.

135. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. / Под ред. Хуанга Т. С. – М.: Радио и связь, 1984.

136. Shishov V. I., Tyul'Bashev S. A., Chashei I. V. et al. Interplanetary and ionosphere scintillation monitoring of radio sources ensemble at the solar activity minimum // *Solar Physics*. – 2010. – V. 265. – P. 277 – 291.

137. Gibson S. E., Kozyra J. U., de Toma G. et al. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – V. 114. – P. 9105.

138. Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K. et al. Non-dipolar solar wind structure observed in the cycle 23/24 minimum // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – V. 36. – L09101.

139. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. О возможности определения угловых размеров источников по наблюдениям межпланетных мерцаний в режиме насыщения. // *Астрономический журнал*. – 2013. – Т. 90. – С. 557 – 564.

140. Marians M. Computed scintillation spectra for strong turbulence // *Radio Science*. – 1975. – V. 10. – P. 115 – 119.

141. Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, URL: <http://www.stelab.nagoyau.ac.jp>.

142. Проект ТЕСИС (Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца, ФИАН), URL: http://www.thesis.lebedev.ru/ru/sun_flares.html.

143. NRAO VLA Archive Survey Images Page, URL: <http://www.aoc.nrao.edu/>

144. Perley R. A. The positions, structures, and polarizations of 404 compact radio sources. // *The Astronomical Journal*. . – 1982. . – V. 87. – P. 859. – 880.

145. Jeyakumar S., Saikia D. J., Pramesh Rao A., Balasubramanian V. Small-scale structures in compact steep-spectrum and GHz-peaked-spectrum radio sources. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2000. . – V. 362. – P.27 – 41.
146. Fomalont E. B., Petrov L., MacMillan D. S. et al. The Second VLBA Calibrator Survey: VCS2 // *The Astronomical Journal*. – 2003. – V. 126. – P. 2562 – 2566.
147. Wehrle A. E., Morabito D. D., Preston R. A. Very Long Baseline Interferometry observations of 257 extragalactic radio sources in the ecliptic region // *Astronomical Journal*. – 1984. – V. 89. – P. 336 – 341.
148. Petrov L., Hirota T., Honma M. et al. VERA 22 GHz Fringe Search Survey // *The Astronomical Journal*. – 2007. – V. 133. – P. 2487 – 2494.
149. Артюх В. С., Смирнова Т. В. Межзвездное рассеяние на частоте 102МГц. // *Письма в астрономический журнал*. – 1989. – Т. 15. – С. 797 – 805.
150. NASA/IPAC Extragalactic Database, URL: <http://ned.ipac.caltech.edu/>
151. Gopalswamy N., Kundu M. R., Manoharan P. K. et al. X-Ray and Radio Studies of a Coronal Eruption: Shock Wave, Plasmoid, and Coronal Mass Ejection // *The Astrophysical Journal*. 1997. V. 486. P. 1036-1044.
152. Boursier Y., Lamy, P., Llebaria, A. The ARTEMIS Catalog of LASCO Coronal Mass Ejections. Automatic Recognition of Transient Events and Marseille Inventory from Synoptic maps // *Solar Physics*. – 2009. – V.257. – P.125 – 147.
153. CDAW Data Center, SOHO LASCO CME catalog, URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html
154. Eyles C. J., Simnett G. M., Cooke M. P., et al. The Solar Mass Ejection Imager (SMEI) // *Solar Physics*. – 2003. – V. 217. – P. 319 – 347.
155. Kaiser M. L., Kucera T. A., Davila J. M. The STEREO Mission: An Introduction // *Space Science Reviews*. – 2008. – V. 136. – P. 5 – 16.
156. Zastenker G. N., Temnyi V. V., Duston C., Bosqued, J. M. The form and energy of the shock waves from the solar flares of August 2, 4, and 7, 1972 // *Journal of Geophysical Research*. – 1978. – V. 83. – P. 1035 – 1041.

157. Gloeckler G., Cain J., Ipavich F. M. et al. Investigation of the composition of solar and interstellar matter using solar wind and pickup ion measurements with SWICS and SWIMS on the ACE spacecraft // *Space Science Reviews*. – 1998. – V. 86. – P. 497 – 539.

158. Веселовский И. С., Панасюк М. И., Авдюшин С. И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // *Космические Исследования*. – 2004. – Т.42. – С.453 – 508.

159. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н. и др. Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45. – С. 23 – 50.

160. Bisi M. M., Breen A. R., Jackson B. V. et al. From the Sun to the Earth: The 13 May 2005 Coronal Mass Ejection // *Solar Physics*. – 2010. – V. 265. – P. 49 – 127.

161. Manoharan P. K. Three-dimensional Evolution of Solar Wind during Solar Cycles 22-24 // *The Astrophysical Journal*. – 2012. – V. 751. – P. 13.

162. Mujiber Rahman A., Shanmugaraju A. Umopathy, S. Propagation of normal and faster CMEs in the interplanetary medium. // *Advances in Space Research*. – 2013. – V. 52. – P. 1168 – 1177.

163. Mostl C., Amla K., Hall J. R. et al. Connecting speeds, directions and arrival times of 22 coronal mass ejections from the sun to 1 au. // *The Astrophysical Journal*. – 2014. – V. 787. – A119.

164. Вальчук Т. Е. Солнечный ветер и магнитные бури 24 цикла солнечной активности // *Астрономический циркуляр*. – 2013. – №1585.

165. Xie H., Gopalswamy N., St. Cyr O. C. Effect of CME interactions on SEP intensity: modeling the 2012-March-07 SEP event with ENLIL // *American Astronomical Society*. – 2013. – SPD meeting №44. – A100.125.

166. Liu Y. D., Luhmann J. G., Lugaz N. et al. On Sun-to-Earth propagation of coronal mass ejections // *The Astrophysical Journal*. – 2013. – V. 769. – P. 45 – 59.

167. Di Fino L., Zacontе V., Stangalini M. Solar particle event detected by ALTEA on board the International Space Station. The March 7th, 2012 X5.4 flare // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2014. – V.4. – A19.

168. Magdalenic J., Rodriguez L., Zhukov A. et al. The CME-driven shock wave on 2012 March 05 and radio triangulation of associated radio emission // 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract D2.5-20-14.

169. Dolei S., Romano P., Spadaro D., Ventura R. Stereoscopic observations of the effects of a halo CME on the solar coronal structure // Astronomy & Astrophysics. 2 – 014. – V. 567. – A9.

170. Syed Ibrahim M., Shanmugaraju A., Bendict Lawrance M. Transit time of CME/shock associated with four major geo-effective CMEs in solar cycle 24 // Advances in Space Research. – 2015. – V. 55. – P. 407 – 415.

171. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Наблюдения выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности. // Астрономический журнал. – 2015. – Т. 92. – С. 46 – 52.

172. Gopalswamy N., Dall Lago A., Yashiro S., Akiyama S. The expansion and radial speeds of coronal mass ejections // Central European Astrophysical Bulletin. – 2009. – V. 33. – P. 115 – 124.

Список иллюстративного материала

- Рисунок 1. Запись мерцающего источника 3C048 на радиотелескопе БСА ФИАН 2 мая 2009 г. По горизонтальной оси отложено время в минутах, по вертикальной – плотность потока в относительных единицах. Результаты диссертанта из работы [124].....25
- Рисунок 2. Спектр мощности мерцаний источника 3C048 на 2 мая 2009 г. По горизонтальной оси отложена частота в герцах, по вертикальной – спектральная плотность мощности в относительных единицах. Масштаб по обеим осям логарифмический. Результаты диссертанта из работы [124].....28
- Рисунок 3. Пример исходной записи источника B0409+231 за 05.08.2011 и трехлепестковой записи, получившейся после обработки сигнала. По горизонтальной оси отложено время в минутах, вертикальной – плотность потока в относительных единицах. Результаты диссертанта из работы [133].....35
- Рисунок 4. Определение центра и нулей источника. Результаты диссертанта из работы [133].....37
- Рисунок 5. Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах в зависимости от времени суток. Минимальное расстояние площадки от Солнца в точке 28. Результаты диссертанта из работы [126]43
- Рисунок 6. Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах в зависимости от времени суток. Минимальное расстояние площадки от Солнца в точке 6 для двух нижних кривых и в точке 9 для двух верхних кривых. Результаты диссертанта из работы [126].....44
- Рисунок 7. Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах, усредненная по месячным интервалам в 2007–2011 гг. Результаты диссертанта из работы [126].....45
- Рисунок 8. Временной спектр мерцаний источника B0531+194 25 июля 2011 г. (режим слабых мерцаний). Масштаб по обеим осям логарифмический. Результаты диссертанта из работы [139].....53

Рисунок 9. Временной спектр мерцаний источника В0531+194 07 июля 2011 г. (режим насыщенных мерцаний). Масштаб по обеим осям логарифмический. Характерная частота излома спектра составляет около 0,35 Гц. Прямые линии иллюстрируют методику определения частоты излома. Результаты диссертанта из работы [139].....54

Рисунок 10. Характерная частота излома временного спектра мерцаний источника В0531+194 в зависимости от синуса элонгации за период наблюдений 23 июня – 31 августа 2011 г. Результаты диссертанта из работы [139].....55

Рисунок 11. Индекс мерцаний источника В0531+194 в зависимости от синуса элонгации 23 июня – 31 августа 2011 г. Масштаб по обеим осям линейный. Результаты диссертанта из работы [139].....56

Рисунок 12. Спектр источника В0531+194 по данным NED [150] и VLA [143]. Точки интегрального спектра – темные кружки, пиковые плотности потока – светлые кружки. Точки VLA обозначены кружками, оценки, полученные по мерцаниям, – треугольниками.....60

Рисунок 13. Источники, индекс мерцаний которых изменился более чем в 1.5 раза — 12 точек на карте. Симметричное расположение относительно Солнца (большой кружок) говорит о том, что возмущение направлено на Землю. Это возмущение от Солнца зафиксировано в мерцаниях 10 июня 2012 г. Результаты диссертанта из работы [133].....68

Таблица 1. События, обнаруженные с июля 2011 г. по июнь 2012 г. Данные о рентгеновских вспышках заимствованы из источника [142]. Данные о геомагнитной активности заимствованы из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний получены диссертантом и опубликованы в работе [133].....70

Рисунок 14. События, обнаруженные с июля 2011 г. по июнь 2012 г. По вертикальной оси отмечено количество событий того или иного типа. По горизонтальной оси дан тип события. Светлым цветом отмечены надежно зафиксированные событие, черным цветом – ненадежно зафиксированные. Данные о рентгеновских вспышках заимствованы из источника [142]. Данные о

геомагнитной активности заимствованы из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний получены диссертантом и опубликованы в работе [133].....72

Рисунок 15. Схема, иллюстрирующая взаимное расположение Земли, Солнца и радиоисточника. Здесь ε – элонгация источника, O – прицельная точка.....77

Рисунок 16. Распределение источников, показавших всплеск мерцаний 5 августа 2011 г., по наблюдаемой площадке. По оси абсцисс отложено прямое восхождение в часах, по оси ординат – склонение в градусах. Линией обозначена эклиптика, большим кругом – Солнце. Результаты диссертанта из работы [171].....79

Рисунок 17. Зависимость оценки V_{x-sc} от элонгации для вспышки класса M9.3 4 августа и всплеска мерцаний 5 августа 2011 г. Данные о вспышках на Солнце, использованные для расчета V_{x-sc} , заимствованы из источника [142], данные о геомагнитной активности – из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [171].....80

Таблица 2. Оценки скоростей СМЕ с июля 2011 по июнь 2012 гг. Данные о вспышках на Солнце заимствованы из источника [142], данные о геомагнитной активности – из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [171].....81

Рисунок 18. Сравнение оценки V_{x-sc} со средней скоростью возмущения V_{cp} для всех событий, представленных в таблице 2. Данные о вспышках на Солнце, использованные для расчета V_{x-sc} и V_{cp} , заимствованы из источника [142], данные о геомагнитной активности – из источника [141]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [171]82