

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

На правах рукописи
УДК 523.62-726+ 524.7-77

Петрухина (Глубокова) Светлана Константиновна

**ПАРАМЕТРЫ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ
МЕРЦАНИЙ СИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ
НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Филиале «Пушкинская радиоастрономическая обсерватория им. В. В. Виткевича АКЦ ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,

Чашей Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: **Писанко Юрий Владимирович,**

доктор физико-математических наук,

Институт прикладной геофизики, Росгидромет,

г. Москва / Зав. лабораторией магнитосферы ИПГ Росгидромета

Ермолаев Юрий Иванович,

доктор физико-математических наук,

Институт космических исследований РАН, г. Москва /
Зав. лабораторией солнечного ветра ИКИ РАН

Ведущая организация: Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук

Защита состоится «18» мая 2016 года в 14:30 на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан «___» апреля 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Солнечный ветер представляет большой интерес для современной астрофизики, радиоастрономии и космических исследований. Можно отметить несколько факторов, которые определяют неослабевающий интерес ученых к данной тематике. Во-первых, солнечный ветер – это самостоятельный астрофизический объект, его характеристики связаны с процессами, происходящими в атмосфере Солнца, что дает возможность, хоть и косвенно, изучая солнечный ветер, делать выводы о природе явлений в солнечной короне. Во-вторых, Солнце – это одна из многих звезд нашей Галактики, поэтому на основании данных о солнечном ветре можно делать предположения о потере массы, углового момента и параметрах корон других звезд, для которых непосредственное исследование звездного ветра в настоящий момент невозможно. В-третьих, большое количество природных явлений связано с солнечным ветром, включая такие явления космической погоды, как магнитные бури и полярные сияния. По этой причине солнечный ветер активно исследуется для решения проблем солнечно-земных связей. Для земного наблюдателя сигналы от астрофизических объектов проходят через солнечный ветер, в результате исходный сигнал может быть искажен, следовательно, понимание природы солнечного ветра крайне важно для анализа наблюдений.

Несмотря на заметный прогресс в понимании природы солнечных процессов, остается еще много нерешенных проблем. По-существу, нет теоретической модели солнечного ветра, учитывающей его бимодальную структуру в период минимума солнечной активности и эволюцию этой структуры в 11-летнем цикле солнечной активности. Однако, учитывая результативность исследований прошлых лет и неослабевающий интерес к проблеме солнечного ветра, можно надеяться, что в ближайшие десятилетия природа солнечных процессов будет понятна и количественная теория будет

создана. Далека от окончательного решения и физическая модель турбулентности солнечного ветра, описывающая генерацию возмущений, формирование и эволюцию энергетических спектров, связь характеристик турбулентности со средними параметрами плазмы.

Цель диссертации. Исследование параметров турбулентной межпланетной плазмы в периоды высокой и низкой солнечной активности по временным спектрам мерцаний сильных радиоисточников на частоте 111 МГц.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Разработана методика одновременной оценки параметров турбулентности солнечного ветра и угловых размеров сильных компактных радиоисточников по наблюдениям мерцаний на турбулентности межпланетной плазмы.

2. Показано, что скорости движения неоднородностей, определенные по временным спектрам мерцаний, в спокойных условиях хорошо согласуются с оценками, полученными методом разнесенного приема.

3. Для 23-24 циклов солнечной активности получена зависимость спектрального индекса мелкомасштабной турбулентности неоднородностей межпланетной плазмы от скорости солнечного ветра. С уменьшением скорости солнечного ветра уменьшается значение спектрального индекса турбулентности. Показано, что зависимость наблюдается в различные периоды солнечной активности: как вблизи минимума, так и в максимуме. Отсюда следует, что механизмы формирования энергетического спектра турбулентности в медленных и быстрых потоках отличаются.

4. Показано, что бимодальная структура солнечного ветра в период низкой активности Солнца проявляется в наблюдаемых характеристиках мерцаний и, следовательно, в уровне мелкомасштабной турбулентности.

5. На основе анализа наблюдательных данных показано, что при прохождении СМЕ временной спектр мощности мерцаний может

значительно изменяться, что связано с сильным отличием распределения плазмы на луче зрения от сферически симметричного.

Научная новизна. В работе приводятся результаты, полученные автором на основе анализа данных наблюдений межпланетных мерцаний на частоте 111 МГц. –Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертации могут быть использованы для развития теоретических моделей турбулентного солнечного ветра, с чем связана астрофизическая значимость работы. Практическая ценность работы заключается в следующем. Во-первых, обоснована возможность измерения скорости солнечного ветра в спокойных условиях по однопунктовым наблюдениям в метровом диапазоне волн, в частности, на радиотелескопе БСА ФИАН. Во-вторых, результаты исследования влияния возмущений на форму временных спектров мерцаний источников разных угловых размеров могут быть использованы для детектирования и исследования крупномасштабных возмущений вспышечного происхождения, то есть в комплексе задач, входящих в проблему «космическая погода».

Методология и методы исследования. Исходный наблюдательный материал получен в результате наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточников. При анализе наблюдательных данных использованы методы математической статистики, автоматизированная обработка наблюдений с использованием существующих и разработанных автором оригинальных программ.

Достоверность результатов. Представленные в диссертации результаты получены с использованием апробированных методов наблюдений, обработки и анализа данных. Угловые размеры источников, полученные другими авторами, близки к нашим результатам. Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости неоднородностей

солнечного ветра подтверждается данными Манохарана [1], полученными на других частотах и в других циклах солнечной активности.

Апробация результатов. Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены в 7 устных докладах и 2 постерах, на различных научных конференциях и семинарах внутри страны и за рубежом.

1) II Пулковская молодежная астрономическая конференция – 2009 (ГАО, Пулково, 2009)

2) 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Украина, Киев, 2012)

3) XLII Young European Radio Astronomers Conference (ПРАО АКЦ ФИАН, Пушино, 2012)

4) Физика плазмы в Солнечной системе (восьмая) (АКЦ, Москва, 2013)

5) Научная сессия АКЦ ФИАН (ПРАО АКЦ ФИАН, Пушино, 2013)

6) 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Украина, Киев, 2013)

7) Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ГАО, Санкт-Петербург, 2013)

8) 43rd Young European Radio Astronomers Conference (Германия, Билефельд, 2013)

9) V Пулковская молодёжная конференция - 2014 (ГАО, Пулково, 2014)

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 8 научных статьях, включая 6 статей в рецензируемых научных изданиях, в том числе 4 статьи – в изданиях, удовлетворяющим требованиям ВАК, а также 9 тезисов докладов опубликованы в материалах конференций, перечисленных выше в разделе «Апробация результатов».

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1) Bisi M. M., ..., Chashei I. V., ..., **Glubokova S. K.** и 25 соавторов. From the Sun to the Earth: The 13 May 2005 Coronal Mass Ejection / M.M. Bisi, ..., I.V. Chashei, ..., S.K. Glubokova [et al.] // Solar Physics. - 2010. - V. 265. - Issue 1-2. - P. 49-127.

2) **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 / С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов // Геомагнетизм и аэрномия. - 2011. - Т. 51. - № 6. - С. 810-815.

Glubokova S. K., Glyantsev A. V., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V., Shishov V. I. Interplanetary scintillations of strong radio sources in the descending phase near the cycle 23 minimum / S. K. Glubokova, A. V. Glyantsev, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, V. I. Shishov // Geomagnetism and Aeronomy. - 2011. - V. 51. - Issue 6. - P.794-799.

3) **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 / С. К. Глубокова, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов // Астрономический журнал. - 2013. - Т. 90. - № 8. - С. 639-647.

Glubokova S. K., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V., Shishov V. I. Parameters of the turbulence of the interplanetary plasma derived from scintillation observations of the quasar 3C 48 at the solar-activity minimum / S. K. Glubokova, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, V. I. Shishov // Astronomy Reports. - 2013. - V. 57. - Issue 8. - P. 586-593.

4) **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 / С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов // Астрономический журнал. - 2015. - Т. 92. - №1. - С. 38-45.

Glubokova S. K., Glyantsev A. V., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V., Shishov V. I. Parameters of the turbulence of the interplanetary plasma derived from scintillation observations of the quasars 3C 48 and 3C 298 at the solar-

activity maximum / S. K. Glubokova, A. V. Glyantsev, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, V. I. Shishov // *Astronomy Reports*. - 2015. - V. 59. - №1. - P 33–39.

Рецензируемые статьи автора по теме диссертации:

5) **Glubokova S. K.**, Chashei I. V., Tyul'bashev S. A. Small-scale solar wind density turbulence spectrum from interplanetary scintillation observations / S. K. Glubokova, I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev // *Advances in Astronomy and Space Physics*. - 2012. - V. 2. - P. 164-166.

6) **Glubokova S. K.**, Chashei I. V., Tyul'bashev S. A., Shishov V. I. Changes in the spectral index of the interplanetary plasma turbulence in the period of low solar activity from observations of strongly scintillating source 3C 298 / S. K. Glubokova, I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov // *Advances in Astronomy and Space Physics*. - 2013. - V. 3. - P. 94-97.

Остальные статьи автора по теме диссертации:

7) **Глубокова С. К.**, Тюльбашев С. А., Чашей И. В. Шишов В. И. Результаты наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточника 3C 20, 3C 48, 3C 298 на фазе спада и в минимуме 23 цикла солнечной активности / С. К. Глубокова, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове*. - 2009. - № 219. - С. 5-12.

8) Чашей И. В., Шишов В. И., Тюльбашев С. А., **Глубокова С. К.**, Глянцев А. В., Субаев И. А. Результаты мониторинга турбулентного солнечного ветра по измерениям межпланетных мерцаний вблизи минимума 23/24 цикла солнечной активности [Электронный ресурс] / И. В. Чашей, В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, И. А. Субаев // *Современные достижения в плазменной гелиогеофизике*. - 2015. - Раздел 4. – Режим доступа: <http://sdpg.cosmos.ru/>

Личный вклад автора. Во всех результатах, которые вынесены на защиту, личный вклад автора является определяющим. Анализ и интерпретация полученных результатов проведены совместно с

сотрудниками отдела плазменной астрофизики ПРАО АКЦ ФИАН. Наблюдения обрабатывались самостоятельно с помощью существующих и созданных автором программ.

Рисунки 1, 3 и 4, 7 в диссертации получены другими авторами, ссылки приведены. Рисунки 2, 5, 6, 8 – 41 в диссертации получены лично автором.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 128 страниц машинописного текста, 41 рисунок, 1 таблицу, библиографию из 180 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении дана общая характеристика работы.

Глава 1. Обзор экспериментальных данных и теоретических работ по солнечному ветру

В первой главе диссертации рассмотрены основные результаты исследования солнечного ветра, которое было начато еще в прошлом веке и до сих активно развивается. Исследования солнечного ветра проводятся не только с помощью КА, но и методами дистанционных наблюдений в радиодиапазоне.

Глава 2. Наблюдения и первичная обработка данных

Во второй главе рассматриваются основы метода межпланетных мерцаний, технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН, на котором проводились наблюдения и методика обработки наблюдений сильных мерцающих источников. Там же обсуждаются особенности и некоторые сложности обработки записей с недостаточным отношением сигнал/шум.

Глава 3. Индексы межпланетных мерцаний и скорость неоднородностей солнечного ветра

С целью проверки методики проведен анализ наблюдений в период вблизи минимума солнечной активности, когда состояние межпланетной плазмы относительно спокойное, и во время прохождения СМЕ. Построенные радиальные зависимости индексов мерцаний в период минимума солнечной активности могут быть использованы в качестве калибровочных для отслеживания СМЕ в период высокой солнечной активности.

§ 3.1. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников 3С 48 и 3С 298 на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности

В настоящем разделе представлены результаты наблюдений межпланетных мерцаний, полученные для указанных выделенных источников, в период с октября 2006 г. по март 2007 г. (источник 3С 298) и с марта по октябрь 2007 г. (источник 3С 48). Период наблюдений соответствует фазе спада 23-го цикла солнечной активности на подходе к минимуму, который, как известно, имел место несколько позднее, в 2008–2009 гг.

Примеры исходных записей источников 3С 48 и 3С 298 представлены на Рисунке 1, где видно, что источник 3С 48 гораздо сильнее, чем источник 3С 298.

На Рисунке 2 в двойном логарифмическом масштабе приведены зависимости индексов мерцаний источников 3С 298 и 3С 48 в зависимости от элонгации ε ($r_0 = 1AU \cdot \sin \varepsilon$ – гелиоцентрическое расстояние прицельной точки луча зрения). При $\varepsilon < 25^\circ$ уровень мерцаний подавляется за счет влияния полосы приемника и собственных угловых размеров источников, поэтому данные на малых элонгациях не приведены. В случае больших элонгаций, $\varepsilon \geq 90^\circ$, эффективно модулирующий турбулентный слой расположен вблизи орбиты Земли, поэтому все данные для больших элонгаций на Рисунке 2 помещены в область $\varepsilon = 90^\circ$. Вписывание степенной функции $m \sim (\sin \varepsilon)^p$ в радиальные зависимости индекса мерцаний (Рисунок 2) дает результат $p \approx -1$ для обоих источников.

В сферически симметричном случае $m \sim r^{-\frac{3}{2}}$. Реально измеряемые зависимости $m(r_0)$, Рисунок 2, оказываются существенно более слабыми, чем в сферически симметричной модели. Причина такого отличия, по-видимому, связана с тем, что при удалении от Солнца источники смещаются к низким

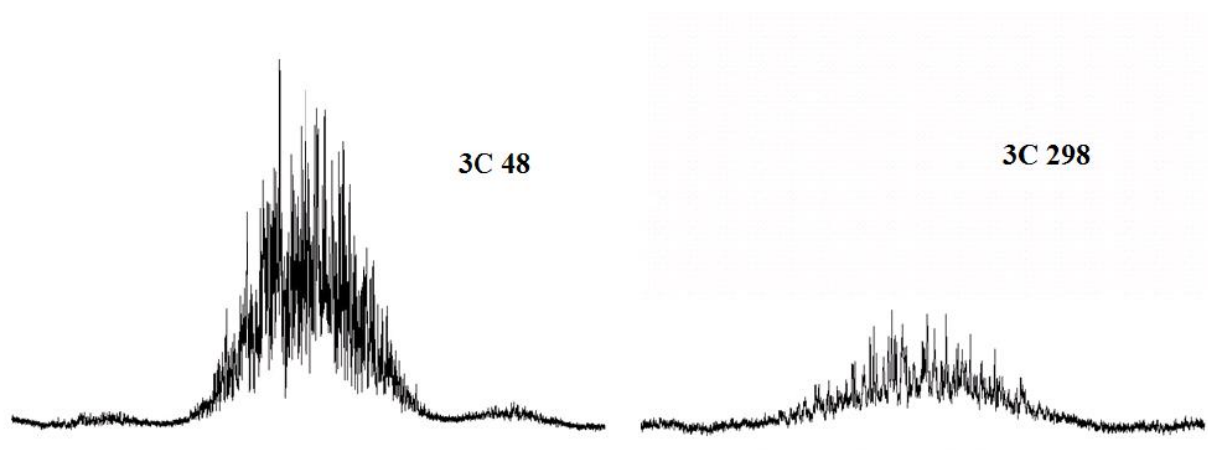


Рисунок 1. Примеры типичных записей источников 3C 48 и 3C 298. Совместный результат диссертанта из работы [2].

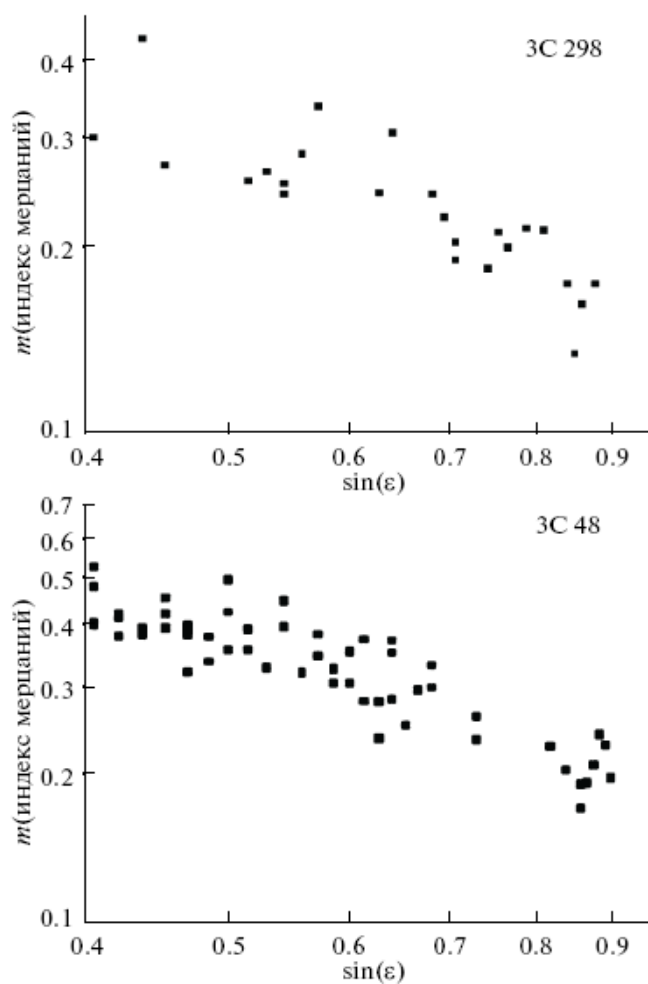


Рисунок 2. Зависимость индекса межпланетных мерцаний от элонгации в полугодичных сериях наблюдений источников 3C 298 (а – 24 дня) и 3C 48 (б – 54 дня). Совместный результат диссертанта из работы [3].

гелиоширотам, геометрия среды не является сферически симметричной. В минимуме солнечной активности в низкоширотных областях расположен гелиосферный токовый слой с низкой скоростью и повышенной концентрацией плазмы. В высокоширотных областях концентрация ниже, а скорость выше, чем в низкоширотных.

По временным спектрам мерцаний определены скорости движения неоднородностей, которые, как показано, хорошо согласуются с оценками, полученными методом разнесенного приема [4]. Использование в последующих сериях наблюдений определяемой по спектрам мерцаний скорости неоднородностей позволит существенно расширить информативность данных мониторинга межпланетной плазмы, который в последние годы проводится на радиотелескопе БСА ФИАН.

§ 3.2. Прохождение выброса корональной массы в мае 2005 г. по наблюдениям мерцающих радиоисточников ЗС 20 и ЗС 48

Направленный к Земле выброс корональной массы типа гало был зарегистрирован космическим аппаратом SOHO 13 мая 2005 г. в 16^h 13^m UT. С выбросом была связана вспышка класса M 8.0 [5].

Результаты, полученные по наблюдениям выброса в мае 2005 г. показывают, что информация о крупномасштабных распространяющихся возмущениях может быть получена не только с использованием сильных мерцающих компактных источников, но и, что важно, протяженных источников типа ЗС 20.

Во время прохождения СМЕ временной спектр мощности мерцаний может значительно изменяться, что связано с сильным отличием распределения плазмы на луче зрения от сферически симметричного. По этой причине скорости солнечного ветра, оцененные по временным спектрам мерцаний могут существенно отличаться от истинных.

Глава 4. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298

В настоящей главе получены оценки параметров турбулентности межпланетной плазмы, проанализирована их связь между собой и эволюция в цикле солнечной активности.

§ 4.1. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в минимуме солнечной активности

В апреле-мае 2007–2009 гг. проведены три серии наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточника 3С48. Наблюдения для источника 3С 298 получены во время длительного спокойного периода ноябрь 2007-2009. Эти периоды находятся вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности.

В период наблюдений радиоисточники 3С 48 и 3С 298 находились в области элонгаций $\varepsilon = 20^0-40^0$, когда IPS достигают максимального значения.

По исходным записям флуктуаций потока излучения источника вычислялись временные спектры мощности IPS. По данным космического аппарата GOES [5] за период наблюдений не обнаружено вспышек классов X или M, т.е. состояние межпланетной плазмы было относительно спокойным.

Зависимости спектрального индекса турбулентности плазмы от наблюдаемой скорости солнечно ветра представлены на Рисунках 3 и 4. Видно, что спектральный индекс турбулентности уменьшается при переходе из быстрого высокоширотного в медленный низкоширотный солнечный ветер. Полученные результаты могут быть объяснены бимодальной структурой солнечного ветра, которая характерна для периода минимума солнечной активности.

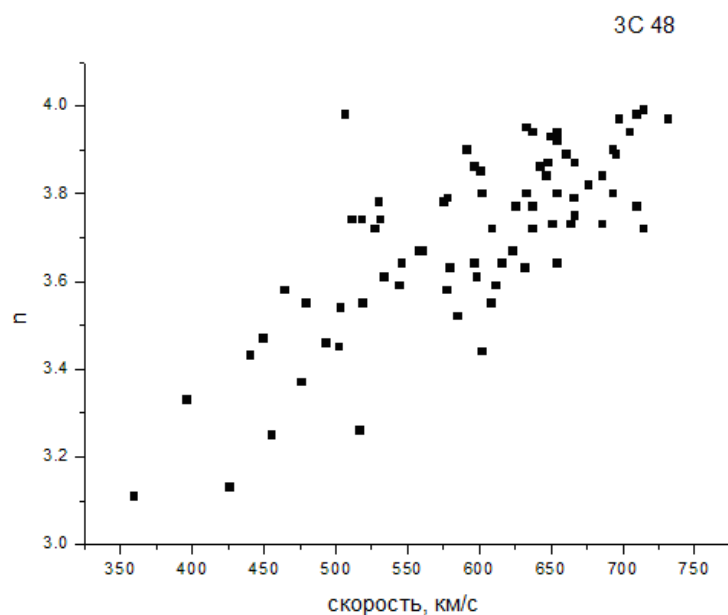


Рисунок 3. Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от скорости солнечного ветра по наблюдениям источника 3C 48. Совместный результат диссертанта из работы [6].

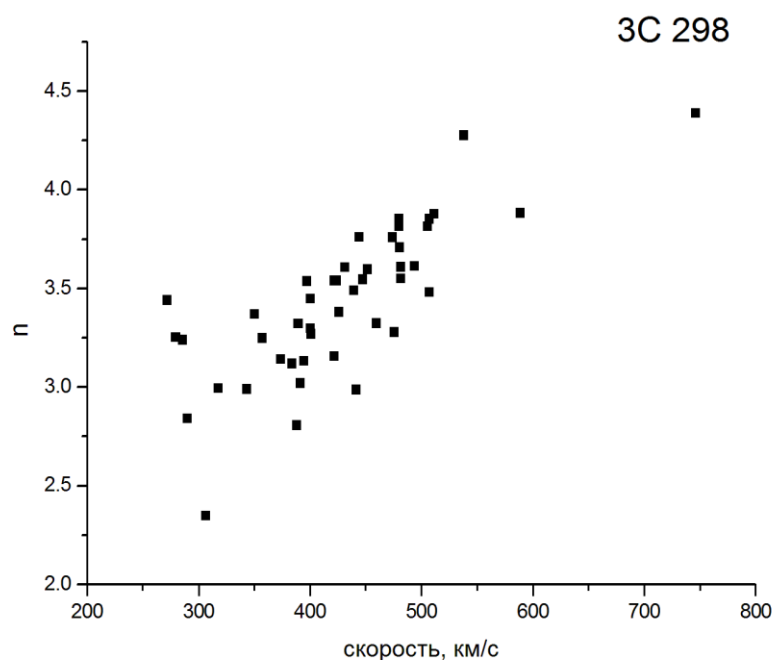


Рисунок 4. Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра для источника 3C 298. Совместный результат диссертанта из работы [2].

§ 4.2. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности

В настоящей главе проанализированы результаты двух серий наблюдений мерцаний: в период апрель-май (источник 3С 48), сентябрь-ноябрь 2013 (источник 3С 298), выполненных в период вблизи максимума солнечной активности. Наблюдения проведены на модернизированной антенне БСА ФИАН. По данным GOES [5] в период наблюдений было зарегистрировано несколько вспышек классов X и M.

Элонгации радиоисточников в период наблюдений составляли 23° - 40° . На таких элонгациях мерцания регистрируются с достаточным для анализа спектров превышением над шумами.

На Рисунке 5 представлены зависимости спектрального индекса турбулентности n от скорости солнечного ветра. Полые кружки на Рисунках соответствуют дням со спокойным состоянием межпланетной плазмы, черные квадраты - ожидаемое прохождение выброса корональной массы (СМЕ), соответствующее вспышкам класса M и X по данным GOES [5] и уменьшению индекса Dst [7]. Ожидалось также, что будет наблюдаться и усиление мерцаний радиоисточника 3С 48. В частности, усиление мерцаний радиоисточника 3С 48 не было подтверждено, хотя сам факт прихода возмущения на Землю был четко зафиксирован по падению Dst-индекса. В то же время на Рисунке 5 видно, что черные квадраты, соответствующие по датам дням прохождения возмущений, концентрируются в области малых скоростей и малых спектральных индексов. Определение спектрального индекса турбулентности по временному спектру мерцаний во время прохождения СМЕ не является корректным, так как форма спектра мерцаний существенно зависит от распределения уровня турбулентности и скорости плазмы на луче зрения.

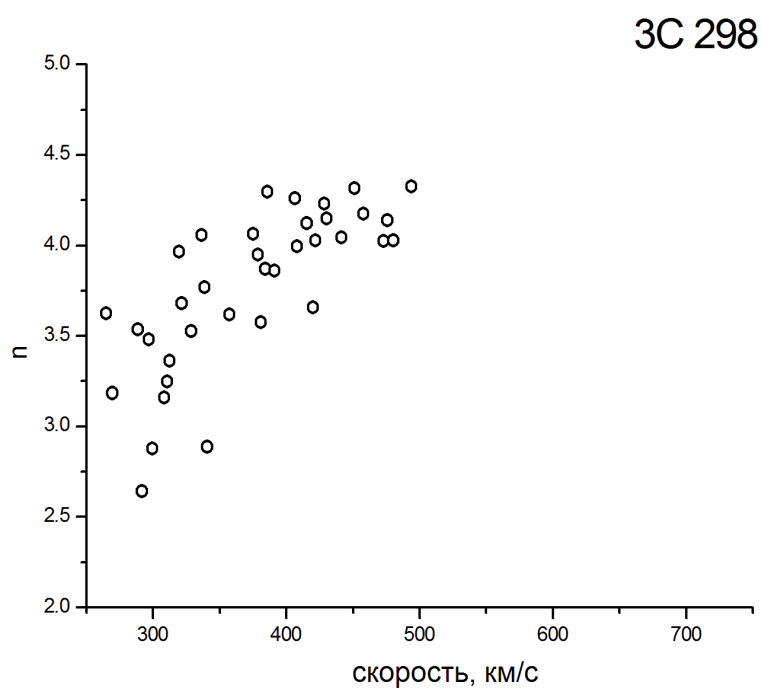
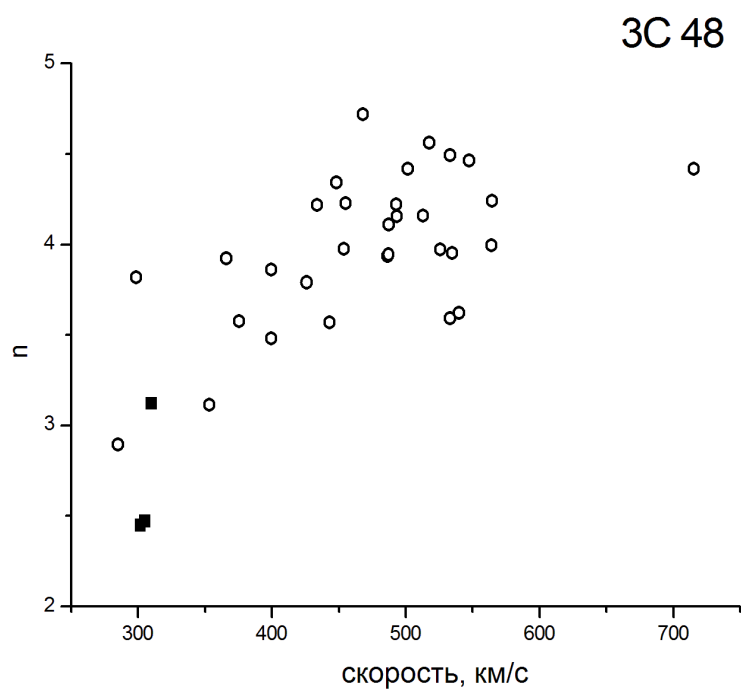


Рисунок 5. Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра по наблюдениям источников 3C 48 (апрель-май 2013) и 3C 298 (сентябрь-ноябрь 2013) Совместный результат диссертанта из работы [8].

Сравнивая значения скоростей, определенных из спектров мощности по наблюдениям источников 3С 48 и 3С 298, легко заметить, что в период наблюдения 3С 298 скорости солнечного ветра не превышают 500 км/с. Это можно объяснить различием в пространственном распределении межпланетной плазмы, которое связано с динамикой глобальной структуры солнечного ветра на интервалах в несколько месяцев.

§ 4.3. Обсуждение результатов

Проводится сравнение результатов, полученных Манохараном [1], и результатов, полученных автором.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, выводы диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика оценки спектрального индекса турбулентности и скорости неоднородностей межпланетной плазмы с помощью временных спектров мощности IPS. Применение описанной методики для анализа наблюдений других компактных сильных источников позволит существенно расширить информативность данных мониторинга межпланетной плазмы, который в последние годы проводится на радиотелескопе БСА ФИАН. После последней модернизации повысилась чувствительность радиотелескопа БСА ФИАН, что позволяет использовать для анализа большее количество радиоисточников и получать более подробную информацию.
2. По временным спектрам мерцаний получены оценки углового размера радиоисточника 3С48; оценки скорости движения неоднородностей и величина спектрального индекса турбулентности получены для источников 3С 48 и 3С 298. Полученные результаты согласуются с результатами других авторов.
3. С помощью описанной методики можно получить глобальную структуру распределения скоростей в периоды спокойного состояния межпланетной плазмы на одиночном наземном радиотелескопе. Эти результаты могут быть полезны для исследований как солнечного ветра, так и пространственной структуры геолиосферы.

4. Полученные результаты указывают на то, что показатель степени трехмерного спектра турбулентности уменьшается при переходе из быстрого высокоширотного солнечного ветра в медленный низкоширотный. Показано, что зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра является реальным эффектом, а не следствием влияния бимодальной структуры в период минимума солнечной активности.
5. Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости неоднородностей межпланетной плазмы наблюдается как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности. Различие состоит в том, что в минимуме активности имеется устойчивая бимодальная структура, а в максимуме активности потоки с разными скоростями могут наблюдаться на всех гелиоширотах.
6. Предыдущий вывод может быть полезен для создания новых теоретических моделей турбулентности межпланетной плазмы и моделей формирования солнечного ветра, учитывающих возможное различие в механизмах ускорения быстрых и медленных потоков.
7. Во время прохождения СМЕ временные спектры мощности IPS могут существенно искажаться, что затрудняет их использование для оценок скорости возмущений. По-видимому, эта же трудность может иметь место и при определении скоростей солнечного ветра методом разнесенного приема.
8. Уменьшение спектрального индекса турбулентности и скорости неоднородностей во время прохождения СМЕ может быть объяснено эффектом проекции при локализации возмущения в удаленных от прицельной точки областях луча зрения (нарушается сферическая симметрия межпланетной плазмы).
9. Для исследования крупномасштабных возмущений (например, СМЕ) можно использовать не только сильные мерцающие компактные источники, но и, что важно, протяженные источники типа 3С 20.
10. Последние два вывода могут быть полезны для детектирования СМЕ и при исследовании распространения СМЕ в межпланетном пространстве, что существенно расширит информативность наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН.

11. Представленная методика разработана для одиночного наземного радиотелескопа. Обслуживание такого инструмента значительно проще и дешевле, чем система радиотелескопов или зонды на борту КА, что свидетельствует об экономической целесообразности использования описанной методики.

Список литературы

1. Manoharan P. K. The spectrum of electron density fluctuations in the solar wind and its variations with solar wind speed / P. K. Manoharan // Journal of geophysical research. - 1994. - V. 99. - № A12. - P. 23,411-23,420.
2. **Glubokova S. K.**, Chashei I. V., Tyul'bashev S. A. et al. Changes in the spectral index of the interplanetary plasma turbulence in the period of low solar activity from observations of strongly scintillating source 3C 298 / S. K. Glubokova, I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev [et al.] // Advances in Astronomy and Space Physics. - 2013. - V. 3. - P. 94-97.
3. **Глубокова С. К.**, Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. и др. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности / С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. - 2011. - Т. 51. - № 6. - С. 810.
4. IPS Observations of the Solar Wind, URL: http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips_data-e.html
5. SolarSoft Latest Events, URL: http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/
6. **Глубокова С. К.**, Тюльбашев С. А., Чашей И. В. и др. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазара 3C 48 в минимуме солнечной активности / С. К. Глубокова, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей [и др.] // Астрономический журнал. - 2013. - Т. 90. - № 8. - С. 639.
7. Real-time (Quicklook) Dst Index Monthly Plot and Table, URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/presentmonth/index.html
8. **Глубокова С. К.**, Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. и др. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3C 48 и 3C 298 в период максимума солнечной активности / С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев [и др.] // Астрономический журнал. - 2015. - Т. 92. - №1. - С. 38-45.