

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

На правах рукописи  
УДК 523.62-726+ 524.7-77

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

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

Москва — 2016

## Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Обзор экспериментальных данных и теоретических работ по солнечному ветру.....	11
§ 1.1. Исследование солнечного ветра с помощью КА.....	12
§ 1.2. Космическая погода.....	18
§ 1.3. Теоретические модели солнечного ветра.....	20
§ 1.4. Турбулентность межпланетной плазмы по данным локальных измерений.....	23
§ 1.5. Исследования солнечного ветра методом радиопросвечивания.....	25
§ 1.5.1. Исследование турбулентности солнечного ветра.....	25
§ 1.5.2. Угловые размеры радиоисточников.....	31
§ 1.6. Турбулентность солнечного ветра и альвеновские волны.....	33
Глава 2. Наблюдения и первичная обработка данных.....	36
§ 2.1. Основы метода межпланетных мерцаний.....	36
§ 2.2. Радиотелескоп БСА ФИАН.....	42
§ 2.3. Методика обработки наблюдений.....	44
§ 2.4. Анализ временных спектров мерцаний.....	50
§ 2.5. Влияние шума на оценку спектрального индекса турбулентности $n$ и углового размера источников.....	57
Глава 3. Индексы межпланетных мерцаний и скорость неоднородностей солнечного ветра.....	62
§ 3.1. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников 3С 48 и 3С 298 на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности.....	62

§ 3.2. Прохождение выброса корональной массы в мае 2005 г. по наблюдениям мерцающих радиоисточников 3С 20 и 3С 48 .....	69
Глава 4. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 .....	76
§ 4.1. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в минимуме солнечной активности .....	76
§ 4.2. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности .....	88
§ 4.3. Обсуждение результатов .....	95
Заключение .....	100
Список литературы .....	102
Список использованных сокращений .....	121
Список таблиц .....	122
Список иллюстраций .....	123

## Введение

**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.

**Содержание и 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.

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 на наземных телескопах.

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.

В главах 3 и 4 представлены результаты наблюдений мерцающих источников на частоте 111 МГц. В третьей главе анализируются индексы межпланетных мерцаний и скорости неоднородностей солнечного ветра. Четвертая глава посвящена анализу параметров турбулентности межпланетной плазмы в различные периоды солнечной активности: вблизи минимума и максимума.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

**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, Пущино, 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 3C 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.,** Глянецев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3C 48 и 3C 298 в период максимума солнечной активности / С. К. Глубокова, А. В. Глянецев, 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 3С 20, 3С 48, 3С 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.

Пользуюсь случаем, чтобы выразить благодарность сотрудникам ПРАО АКЦ ФИАН: Чашею И. В., Шишову В. И. – за плодотворное обсуждение проблем, затронутых в диссертации, ценные советы, Дагкесаманскому Р. Д., Смирновой Т. В. - за полезные замечания, Тюльбашеву С.А. – за помощь в разработке методики обработки наблюдений, за обсуждение результатов и поддержку, Глянцеву А. В. - за совместную работу.

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

Высокая, порядка миллионов градусов, температура короны Солнца приводит к непрерывному истечению плазмы. На расстояниях более 0.1 а.е. поток плазмы является сверхзвуковым и сверхальвовенским.

Косвенные свидетельства существования непрерывного потока плазмы от Солнца были получены из наблюдений отклонения хвостов комет, геомагнитных возмущений и вариаций космических лучей задолго до начала космической эры. Еще тогда были получены правильные порядки величины для плотности и скорости солнечного ветра.

В данной главе описываются общие представления о характеристиках солнечного ветра, о состоянии исследований по данной тематике. К настоящему времени опубликовано огромное количество работ, посвященных изучению солнечного ветра, поэтому в обзор включены только сведения и результаты, имеющие отношение к вопросам, рассмотренным в диссертации.

## § 1.1. Исследование солнечного ветра с помощью КА

Исследования солнечного ветра с помощью локальных (*in situ*) измерений с борта космических аппаратов (КА) дают информацию о различных гидродинамических параметрах, химическом составе и функции распределения частиц.

В 1959 советская автоматическая межпланетная станция «Луна 2» [2], первая в мире станция, достигшая поверхности Луны, а позже — «Луна-3» [3] провели прямое измерение движущихся с высокими скоростями заряженных частиц солнечного ветра при помощи ионных ловушек. КА (космический аппарат) Explorer 10 в 1961 также провел измерения солнечного ветра [4]. Благодаря более совершенным плазменным ловушкам на борту КА удалось определить скорость потока – 280 км/с. Обнаруженный поток плазмы был близок к ожидаемому для солнечного ветра. Наблюдения проходили короткие промежутки времени, поэтому не было убедительных доказательств непрерывности потока плазмы.

В 1962 году американский зонд Mariner 2, направляющийся к Венере, провел наблюдения солнечного ветра в течение трех месяцев, после которых не осталось сомнений в существовании солнечного ветра [5-7]. Скорость солнечного ветра изменялась от 320 до 770 км/с, то есть солнечный ветер имеет медленную и быструю компоненты. Медленный ветер движется со скоростью 300-400 км/с и в два раза плотнее, чем быстрый ветер. Быстрый ветер имеет скорость около 750 км/с. Полученные результаты свидетельствовали о непрерывном сверхзвуковом потоке плазмы, который был предсказан моделью солнечного ветра Паркера (подробнее об этой модели будет написано в § 1.3.). Каждые 27 дней Mariner 2 регистрировал высокоскоростной ветер, предположительно это связано с

вращением Солнца. Кроме того, пики геомагнитной активности, также повторяющиеся каждые 27 дней, были связаны с приходом этих потоков высокой скорости к Земле. Это указывает на прямую связь между некоторыми источниками на Солнце и возмущениями магнитного поля Земли.

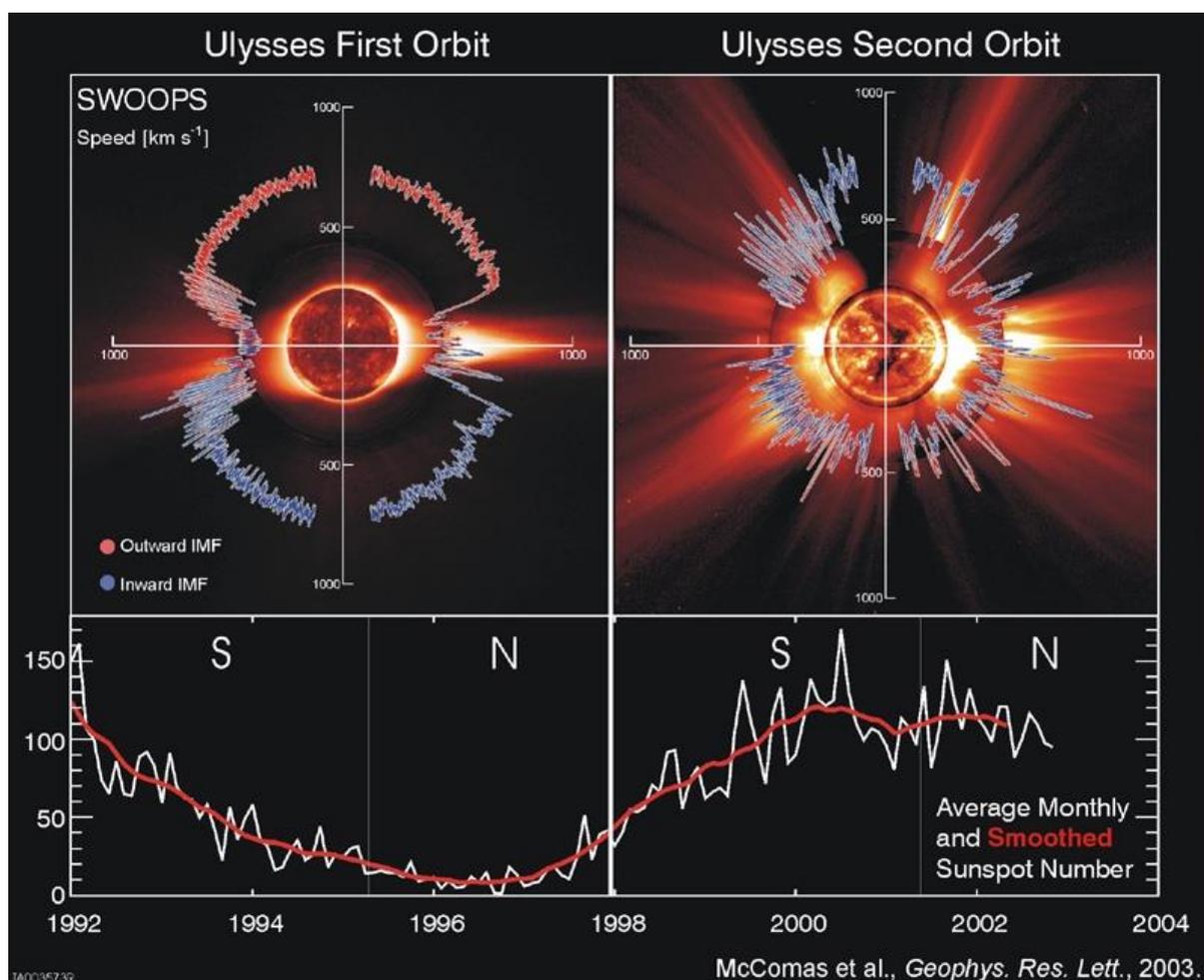
Дальнейшее развитие космических технологий и активное изучение солнечного ветра позволило накопить многочисленные экспериментальные данные. Результаты исследований представлены в ряде работ [8-13]. Солнечный ветер представляет собой радиально направленный сверхзвуковой и сверхальвовенский поток плазмы. Основные параметры плазмы солнечного ветра вблизи орбиты Земли имеют следующие характерные значения (в среднем): скорость  $v = 300\text{--}800$  км/с, концентрация  $N = 5\text{--}10$  см<sup>-3</sup>, индукция магнитного поля  $B \approx 5 \cdot 10^{-5}$  Гс, температура протонов  $T_p = 10^4\text{--}10^5$  К, температура электронов  $T_e \approx 10^5$  К.

В 1990 был запущен зонд Ulysses (совместный проект NASA и European Space Agency (ESA)) для изучения широтной зависимости солнечного ветра и межпланетной плазмы. За время работы Ulysses совершил два полных оборота вокруг Солнца по почти полярной орбите с афелием на гелиоцентрическом расстоянии 5.4 а. е. и перигелием на гелиоцентрическом расстоянии 1.3 а. е. В период минимума солнечной активности при удалении зонда от плоскости эклиптики и приближении к полюсам Солнца (увеличение гелиошироты) течение плазмы становилось пространственно однородным, быстрым ( $\approx 750$  км/с), разреженным, с температурой выше средней температуры солнечного ветра в плоскости эклиптики. Быстрый солнечный ветер истекает из корональных дыр, расположенных на полюсах Солнца и составляет почти 80% гелиосферы. В быстром солнечном ветре радиальная компонента магнитного поля не зависит ни от широты, ни от долготы, а нерадиальные компоненты магнитного поля и скорости при изменении широты и/или долготы изменяются в фазе [14]. Медленный солнечный ветер расположен вблизи плоскости эклиптики (в интервале широт  $\pm 30^\circ$ ). На Рисунке 1 на левой половине представлена

зависимость скорости солнечного ветра от гелиошироты в период минимума солнечной активности.

Зависимость скорости солнечного ветра от гелиошироты в максимуме цикла солнечной активности по данным КА «Ulysses» представлена на Рисунке 1 справа. Солнечный ветер на всех гелиоширотах является медленным, пространственная структура близка к сферически симметричной.

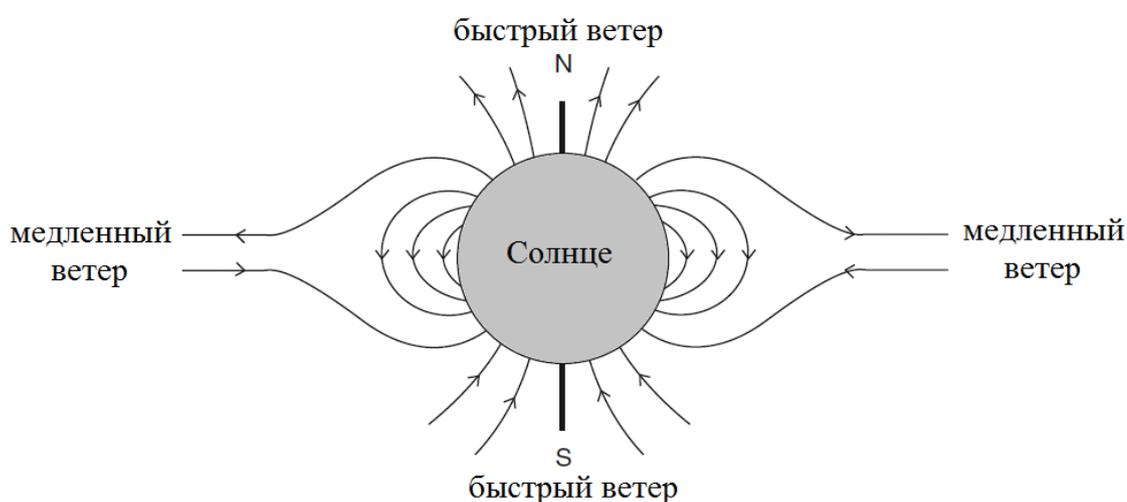
Еще раньше изменения глобальной структуры солнечного ветра в 11-летнем цикле солнечной активности получены по радиоастрономическим данным [16-18], а также по данным КА «Helios» [19] (см. Таблицу 1) и др. Из данных КА ULYSSES [15] следует, что среднее значение (на достаточно длительном



**Рисунок 1.** Зависимость скорости солнечного ветра от широты по данным прямых измерений с борта КА «Ulysses». Верхний левый рисунок соответствует периоду минимума солнечной активности (17 августа 1996), а верхний правый – периоду максимума солнечной активности (07 декабря 2000 года). Значения чисел Вольфа показаны в нижней части рисунка. [15].

**Таблица 1.** Средние параметры солнечного ветра, измеренные зондами Helios [19].

Параметр	Быстрый ветер	Медленный ветер
Основной источник	Корональные дыры	Экваториальные стримеры
Состав/плотность	Однородный	Неоднородный
Линии магнитного поля	Открытые	Замкнутые
Скорость протонов	750 км/с	343 км/с
Температура протонов	280 000°С	55 000°С
Температура гелия	730 000°С	170 000°С



**Рисунок 2.** Линии магнитного поля вокруг Солнца во время минимума солнечной активности. Быстрый ветер выходит из полярных областей, где поле открыто, и медленный ветер выходит из экваториальных областей, где поле более замкнуто. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

интервале) плотности потока массы практически не зависит от гелиошироты и фазы цикла солнечной активности.

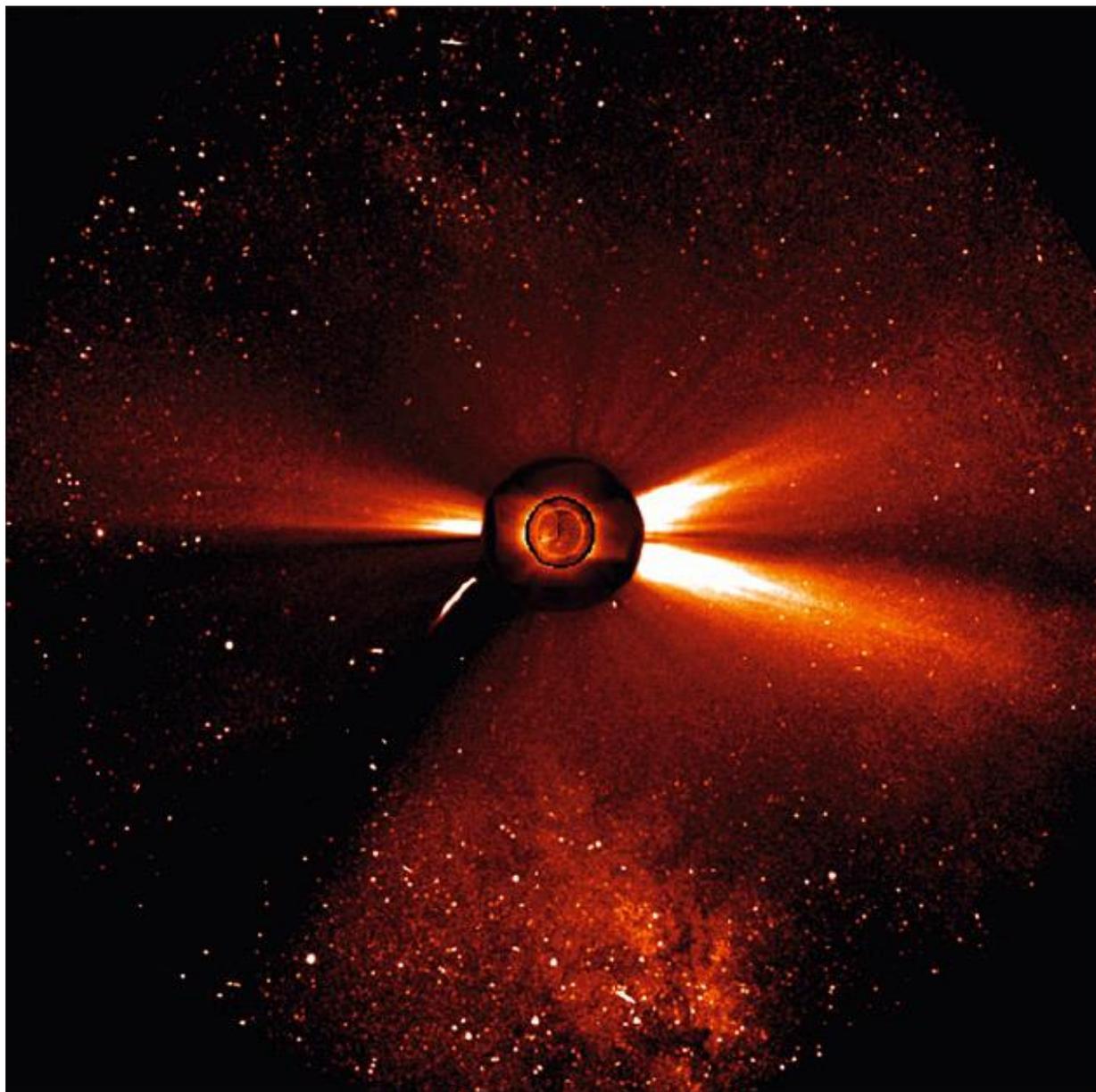
В минимуме солнечной активности быстрый ветер истекает из Солнца вдоль открытых магнитных силовых линий в полярных корональных дырах. Корональные дыры в этот период расположены около полюсов Солнца. Медленный ветер истекает из приэкваториальной области корональных

стримеров, где линии магнитного поля вблизи Солнца замкнуты (см. Рисунок 2). Корональные стримеры похожи на пучок полос из частиц, движущихся наружу через солнечную корону. Они видны во время полного солнечного затмения или в изображениях, полученных коронографом. Считается, что корональные полосы связаны с активными областями и/или протуберанцами и наиболее впечатляющие вблизи максимума солнечного цикла. Хотя они могут быть длиннее, чем диаметр Солнца, они очень разрежены; вещество в них постепенно отходит от Солнца и становится частью солнечного ветра (см. Рисунок 3).

Во время максимума солнечной активности скорости солнечного ветра более разнообразны и ниже, и похоже, что они формируются в различных источниках, включая корональные дыры, корональные стримеры, выбросы корональной массы (СМЕ – coronal mass ejection) и активные области Солнца. Во время максимума активности большие полярные корональные дыры сжимаются и исчезают, и быстрый ветер истекает из сравнительно малых дыр (Таблица 1).

Конфигурация быстрого и медленного солнечного ветра зависит от широты и магнитной структуры Солнца (которая изменяется в 11-летнем солнечном цикле).

В достаточно удаленных от Солнца областях ( $r > r_{ac}$ , где  $r_{ac}$  - внешняя граница зоны ускорения) солнечный ветер становится сформировавшимся потоком и не зависит от гелиоцентрического расстояния. В области  $r < r_{ac}$  скорость плазмы увеличивается с увеличением расстояния от Солнца  $r$ . На «разгонной кривой» солнечного ветра можно выделить особые точки: звуковую ( $v = c_s$ ,  $r = r_s$ ) и альвеновскую ( $v = v_A$ ,  $r = r_A$ ). «Разгонная кривая»  $v(r)$  имеет ключевое значение для понимания физических процессов формирования солнечного ветра. Локальные наблюдения в областях близких к Солнцу ( $r < r_{ac}$ ) в ветра. Локальные наблюдения в областях близких к Солнцу ( $r < r_{ac}$ ) в настоящее время невозможны, поэтому информация о положении точек  $r_s$ ,  $r_A$  и  $r_{ac}$  отсутствует. Однако косвенные данные свидетельствуют, что «разгонные кривые» для потоков различного типа могут заметно отличаться. Так, суммируя наблюдения с борта КА «Ulysses»,



**Рисунок 3.** Композиция изображений с EUV, полученная 23 декабря 1996 инструментами на КА SOHO. Внутреннее изображение (в центре) показывает корону при температуре около 2-2.5 миллиона градусов. Видно, что электрически заряженный корональный газ дует в сторону от Солнца только за пределами внутреннего темного круга, который обозначает край затмевающего диска инструмента. Можно увидеть три заметных корональных стримера (два на западе и один на востоке). Поле зрения этого прибора охватывает 32 диаметра Солнца. Чтобы представить это в перспективе, диаметр этого изображения 45 миллионов километров от Солнца, или половина диаметра орбиты Меркурия. Виден центр Млечного Пути, а также темная межзвездная пыль, которая простирается с юга на север. На изображении также показана Комета SOHO-6 (вытянутая полоса около 7:30 ч), одна из нескольких десятков комет, пролетающих по касательной к Солнцу, обнаруженных SOHO [20].

наблюдения с помощью коронографа LASCO на борту КА SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) [21] и данные радиопросвечивания когерентными сигналами космических аппаратов [22], получены первые экспериментальные точки на «разгонной кривой» солнечного ветра. Для полярного (быстрого) солнечного ветра эта кривая оказалась круче соответствующей кривой, относящейся к плоскости эклиптики (медленный ветер). Медленный солнечный ветер разгоняется до расстояний  $r = r_{ac} \approx 20R_{\odot}$ . Обнаружено, что полярный ветер разгоняется намного быстрее (по данным [23]  $r = r_{ac} \approx 20R_{\odot}$ ), чем это может быть за счет только термодинамического расширения.

## § 1.2. Космическая погода

В последние десятилетия интенсивно исследуется комплекс проблем космической погоды. Космическая погода включает текущую обстановку на Солнце и в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере. Приходящие от Солнца возмущения могут влиять на функционирование КА и наземных технологических систем, могут оказывать воздействие на биологические системы, в том числе на человека.

Солнечные вспышки связаны с быстрой перестройкой магнитных полей в активных областях Солнца. Не представляется возможным точно предсказать, когда произойдет солнечная вспышка с последующим возникновением СМЕ, но, когда явление произошло, требуется 1-2 дня, чтобы возмущение достигло Земли.

КА SOHO наблюдает распространение CME в короне Солнца. Приборы, установленные на борту КА SOHO могут фиксировать локально солнечные энергичные частицы и солнечный ветер, эти данные обеспечивают предупреждение примерно за 40 минут до прихода ударной волны к Земле [20]. КА ACE ведет наблюдения в режиме реального времени и предоставляет краткосрочные прогнозы космической погоды [24].

Запуск NASA-ESA проекта STEREO (Solar-Terrestrial Relations Observatory) добавил дополнительный поток данных о космической погоде, который охватывает область между Солнцем и Землей со стереоскопическим изображением. Это дает возможность определить местоположение источника выброса на Солнце и траекторию его движения, которые невозможно определить по одиночному наблюдению [25].

Самые сильные геомагнитные бури вызываются CME. Интенсивность геомагнитных бурь обычно описывается с помощью индексов Dst (Disturbance storm time index) [26] и Kp (квазилогарифмический планетарный индекс) [27]. Мониторинг Dst-индекса ведется на 5 приэкваториальных станциях, анализируются возмущения магнитного поля, вызванные межпланетной плазмой. Чем интенсивнее буря, тем меньше значение индекса Dst. Так, умеренным бурям соответствуют значения Dst-индекса в интервале от -50 до -100 нТл, сильным – от -100 до -200 нТл, а экстремальным – ниже -200 нТл.

Для отслеживания солнечных вспышек от их начала на Солнце до прихода к Земле используются КА и наземные телескопы. Приборы на борту SOHO и Hinode [28], например, следят за изменением магнитных полей в фотосфере, а также за излучением в жестком ультрафиолете и рентгене от солнечных вспышек. Коронографы на борту SOHO и два зонда STEREO обнаруживают CME. ACE, Wind и Ulysses могут следить за ходом электронов солнечной вспышки и распространением CME в межпланетном пространстве.

Зонд GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) может фиксировать всплески излучения в рентгене и энергичные частицы [29]. GOES 1 был запущен в 1975, и с тех пор запустили несколько других КА. GOES получает изображения Земли для краткосрочных прогнозов погоды и отслеживания бурь, а также мониторинга космического пространства, включая изменения в потоке мягкого рентгена от Солнца. GOES также классифицирует мягкий рентген от вспышек как А, В, С, М или Х, от слабых к сильным, в соответствии с пиком регистрируемого потока. Каждый класс имеет максимум потока в десять раз больше, чем предыдущий.

Для более полной картины распространения СМЕ через солнечный ветер и краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений желательны также данные относящиеся к областям, расположенным внутри орбиты Земли. Такие данные могут быть получены по наблюдениям межпланетных мерцаний компактных радиоисточников на наземных радиотелескопах.

### **§ 1.3. Теоретические модели солнечного ветра**

До конца 50-х гг. XX столетия корону Солнца и ее продолжение в межпланетное пространство рассматривали как гидростатическое образование. Одна из первых моделей солнечного ветра была предложена Чепменом [30-32]. В ней предполагалось, что корона и удаленные области сферически-симметричны, находятся в гидростатическом равновесии, отсутствуют любые источники и стоки энергии (например, лучистый перенос), энергия передается только путем

теплопроводности. Следствием этой модели было высокое значение плотности ( $10^2$ - $10^3$  см<sup>-3</sup> для  $r=1$  а.е.) и температуры ( $\approx 4 \cdot 10^5$  К) вблизи Земли. Полученные оценки совпадали с результатами других авторов [33]. Модель показывает, что солнечная корона не заканчивается вблизи Солнца, а продолжается в межпланетное пространство. В модели Чепмена подчеркивается важная роль теплопроводности в поддержании короны и ее расширении. Таким образом, модель Чепмена имела важное астрофизическое значение. Однако, модель имеет существенные трудности на больших гелиоцентрических расстояниях.

В 1958 Паркер опубликовал более полную теорию потока коронального вещества, который именно он и назвал «солнечным ветром» [34, 35]. В гидродинамической модели Паркера сферически-симметричная изотермическая корона непрерывно движется, все ее физические характеристики зависят от гелиоцентрического расстояния  $r$ , но не меняются со временем (стационарное состояние плазмы), отсутствует вязкость, считается, что Солнце не вращается и не имеет магнитного поля.

В модели Паркера солнечная корона является источником радиального потока частиц (преимущественно протоны и электроны), которые, несмотря на притяжение Солнца, не тормозятся, а ускоряются. При удалении от Солнца сила тяготения уменьшается, и плазма из дозвукового режима течения переходит в сверхзвуковой, как это происходит в сопле Лаваля. Паркер также показал, что из-за вращения Солнца и радиального потока солнечного ветра межпланетное магнитное поле имеет спиральную форму. Форма была подтверждена КА, вращающимися вокруг Солнца.

Модель Паркера в качестве существенного элемента содержит особую точку, но в силу предположения об изотермичности короны не описывает реальные физические причины ускорения плазмы.

Модель Паркера дает слишком большие значения потока числа частиц вблизи Земли и слишком большую скорость расширения в короне. Подробнее это

обсуждается, например, в работе [36]. Модель Паркера лишь в общих чертах описывает физику солнечного ветра.

Последующие модели солнечного ветра учитывали электромагнитные силы, рассматривали политропные модели плазмы (переход от изотермических моделей) и уравнения энергии, учитывающие дополнительные источники энергии.

Ранние модели, учитывающие вязкость обсуждаются в работах [37-42]. Магнитное поле рассмотрено в работах [43-48]. Двухжидкостные модели рассмотрены, например, в статье [49]. Экзосферные модели солнечного ветра представлены в работах [50, 51]. К настоящему времени создано множество моделей [10, 52-63].

К настоящему времени установлено, что тепловая энергия короны недостаточна для формирования солнечного ветра с наблюдаемыми свойствами и требуются дополнительные источники, ускоряющие солнечный ветер. В литературе обсуждаются различные механизмы нагрева и ускорения: альвеновские волны, нановспышки, плазменные выбросы из микроспикул, магнитное пересоединение и т. д. В работах [57-59] развита самосогласованная модель нагрева короны и ускорения солнечного ветра волновым источником энергии, согласно которой скорость установившегося солнечного ветра определяется потоком энергии волн, выходящим в солнечную корону. Турбулентность в солнечном ветре формируется тем же исходным источником. Поэтому исследование свойств турбулентности в разноскоростных потоках даже на больших расстояниях от Солнца важно не только для определения природы локальных флуктуаций, но также для понимания природы корональных источников солнечного ветра.

Во всех моделях существуют упрощения, поэтому каждая модель может описать лишь часть наблюдаемых процессов в солнечном ветре. Многие важные явления солнечного ветра, к сожалению, пока не имеют адекватного теоретического описания. С другой стороны в некоторых случаях

экспериментальных данных недостаточно для уверенного выбора между различными теоретическими моделями.

#### **§ 1.4. Турбулентность межпланетной плазмы по данным локальных измерений**

Солнечный ветер является открытой неравновесной системой, поэтому в нем возникают мелкомасштабные структуры, неоднородности, турбулентность и волны на всех расстояниях от Солнца. Все параметры плазмы – магнитное поле, плотность, скорость и др. – флуктуируют на всех доступных для измерений пространственных и временных масштабах. С помощью приборов на бортах КА исследуются флуктуации параметров межпланетной плазмы. Временной спектр мощности характеризует турбулентные флуктуации и содержит информацию о распределении турбулентной энергии по временным и пространственным масштабам. Пространственный спектр турбулентности имеет степенной вид в инерционном интервале, который ограничен внешним и внутренним масштабами турбулентности. В настоящий момент нет единой теории, описывающей турбулентность солнечного ветра.

Флуктуации магнитного поля в окрестности орбиты Земли исследовали КА IMP, «Vela», «Mariner» [64, 65], OGO, Wind [66, 67] и др.; КА «Helios-1, -2» [68, 69] предоставили информацию для расстояний  $0,3a. e. < r < 1 a. e.$ ; КА «Pioneer-10, -11», «Voyager-1, -2» [70], «Ulysses» [71-73] зондировали пространство за пределами орбиты Земли.

Для областей около 1 а.е. получены близкие к степенным временные спектры флуктуаций магнитного поля, в работе [64] для интервала частот  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  Гц показатель степени  $\alpha \approx 1.2$ , в статье [65] для частот  $3 \cdot 10^{-4}$  -  $3 \cdot 10^{-1}$  Гц  $\alpha \approx 1.5$ . Дальнейшие исследования показали, что в широком диапазоне частот показатель степени  $1.5 \leq \alpha < 2$  [74].

В работах [68, 69] представлены результаты исследований спектров флуктуаций магнитного поля для гелиоцентрических расстояний  $0.3a. e. < r < 1 a.e.$  На основании этих данных показатель степени зависит от частоты. Так, для интервала частот  $4 \cdot 10^{-3}$  -  $10^{-1}$  Гц  $\alpha \approx 1.6$  и не зависит от  $r$ ; для частот меньше  $4 \cdot 10^{-3}$  Гц  $\alpha$  увеличивается от  $\alpha = 1.0$  при  $r = 0.3a. e.$  до  $\alpha = 1.6$  при  $r = 1 a. e.$ ; для частот больше 1 Гц  $\alpha$  возрастает до  $\alpha = 3.4$ , а частота излома спектра уменьшается при увеличении  $r$ . Аналогичные результаты получены по данным КА «Ulysses» для  $1 a. e. < r < 4 a.e.$  [71-73]. В обзоре [75] представлены подробные данные о флуктуациях магнитного поля.

Для понимания физики турбулентности солнечного ветра сравниваются флуктуации различных параметров межпланетной плазмы. В работе [76] исследуется зависимость между флуктуациями скорости и флуктуациями магнитного поля, свойства альвеновских волн рассмотрены в [75, 77-79]. Результаты наблюдений на КА «Helios» представлены в [75].

Исследование временных спектров флуктуаций плотности в инерционном интервале описано в [80-82]. Спектры флуктуаций плотности являются степенными в этом интервале и аналогичны спектрам флуктуаций магнитного поля. Результаты наблюдений быстрых вариаций плотности солнечного ветра с помощью КА Интербол-1 представлены в работе [83]. Мелкомасштабные флуктуации межпланетной плазмы обсуждаются в [84, 85].

По данным КА Интербол-1 и Wind обнаружены резкие скачки плотности длительностью несколько минут и меньше [86, 87]. Скачки плотности наблюдаются весьма часто – несколько десятков событий в сутки. Авторы

предполагают, что большие и резкие скачки являются границами между мелкомасштабными и крупномасштабными структурами в солнечном ветре. Проблема происхождения этих скачков к настоящему времени не решена.

## **§ 1.5. Исследования солнечного ветра методом радиопросвечивания**

### **§ 1.5.1. Исследование турбулентности солнечного ветра**

Метод просвечивания, предложенный Виткевичем В. В. в 1951 г. [88], позволяет исследовать межпланетную плазму методами радиоастрономии. Идея метода заключается в просвечивании околосолнечного пространства излучением удаленных дискретных источников. Таким образом, можно исследовать области солнечного ветра, не доступные для прямых измерений. Одни из первых наблюдений методом просвечивания были проведены для Крабовидной туманности [89], было обнаружено увеличение угловых размеров туманности по мере приближения ее к Солнцу. Полученный результат свидетельствовал о наличии турбулентной плазмы за пределами солнечной короны. Начала активно развиваться теория распространения электромагнитных волн в случайно неоднородных средах [90-92], которая способствовала развитию метода просвечивания.

При распространении электромагнитной волны в турбулентной среде наблюдаются явления рефракции, дифракции и интерференции на случайных

неоднородностях показателя преломления. В результате этих явлений видимый угловой размер источника увеличивается, а амплитуда, интенсивность и фаза флуктуируют. В работах [89, 93] по измерениям угла рассеяния показано, что в околосолнечном пространстве ( $r \leq 10R_{\odot}$ ) постоянно находится турбулентная плазма с масштабами неоднородностей 1-10 км, причем угол рассеяния увеличивается при приближении к Солнцу.

Метод мерцаний, в котором применяются наблюдения компактных радиоисточников (например, квазаров и активных ядер галактик), стал следующим этапом. Подробнее о методе мерцаний написано в § 2.1. Метод мерцаний позволил исследовать неоднородную структуру межпланетной плазмы, получены оценки характерных размеров неоднородностей и электронной концентрации [94, 95]. Одновременные наблюдения мерцаний в трех различных пунктах, позволили определить форму и скорость движения неоднородностей [96-101]. Различная активность в солнечном ветре описана в работах [96, 99]. Радиальные и гелиоширотные зависимости солнечного ветра представлены в работах [17, 18, 102-104]. В то время КА исследовали главным образом область эклиптики, радиоастрономические наблюдения внесли существенный вклад в исследование солнечного ветра, так как предоставили информацию о параметрах межпланетной плазмы в областях, не доступных для КА. К тому же наземные наблюдения гораздо дешевле локальных измерений.

В работах [105-107] обсуждается гипотеза о том, что пространственный спектр турбулентности является степенным на масштабах неоднородностей  $< \sim 3 \cdot 10^7$  см. Временные спектры межпланетных мерцаний исследовались так же в работе [108], измерен спектр турбулентности на расстояниях 0.3-1 а.е. В широком диапазоне масштабов спектр является степенным с показателем степени трехмерного спектра  $n = 3.6$ .

В области установившегося течения солнечного ветра, когда скорость потока не зависит от  $r$ , пространственный спектр флуктуаций концентрации плазмы степенной, и  $\alpha = 1.6 \pm 0.2$  (в области частот более 0.1 Гц) и не зависит от расстояния от Солнца [109, 110].

Спектры мелкомасштабных неоднородностей обсуждаются в обзоре [111].

С помощью радиоинтерферометрических систем со сверхдлинными базами [112] получены оценки показателя степени спектра турбулентности.

В качестве источников в методе просвечивания можно использовать радиосигналы с бортов КА, что существенно увеличивает возможности метода радиопросвечивания. Искусственные источники радиоизлучения являются точечными, когерентными и узкополосными. Анализируя флуктуации частоты от КА GALILEO, удалось получить оценки внешнего масштаба турбулентности солнечного ветра на гелиоцентрических расстояниях  $7-80 R_{\odot}$ , радиальная зависимость внешнего масштаба турбулентности оказалась близка к линейной [113].

Флуктуации магнитного поля по наблюдениям фарадеевских флуктуаций оценивались по наблюдениям радиосигналов от КА «Helios-1, -2» [113-115], показано, что неоднородности магнитного поля являются причиной фарадеевских флуктуаций. В работах [116, 117] получены оценки скорости движения магнитных неоднородностей, на расстояниях около  $5 R_{\odot}$  неоднородности движутся от Солнца со скоростью  $600$  км/с. Полученные оценки скорости магнитных неоднородностей значительно выше значения скорости солнечного ветра, то есть магнитные флуктуации связаны с альвеновскими волнами.

Результаты экспериментов по радиопросвечиванию околосолнечных областей с участием КА «Ulysses» и «Galileo» описаны в [22].

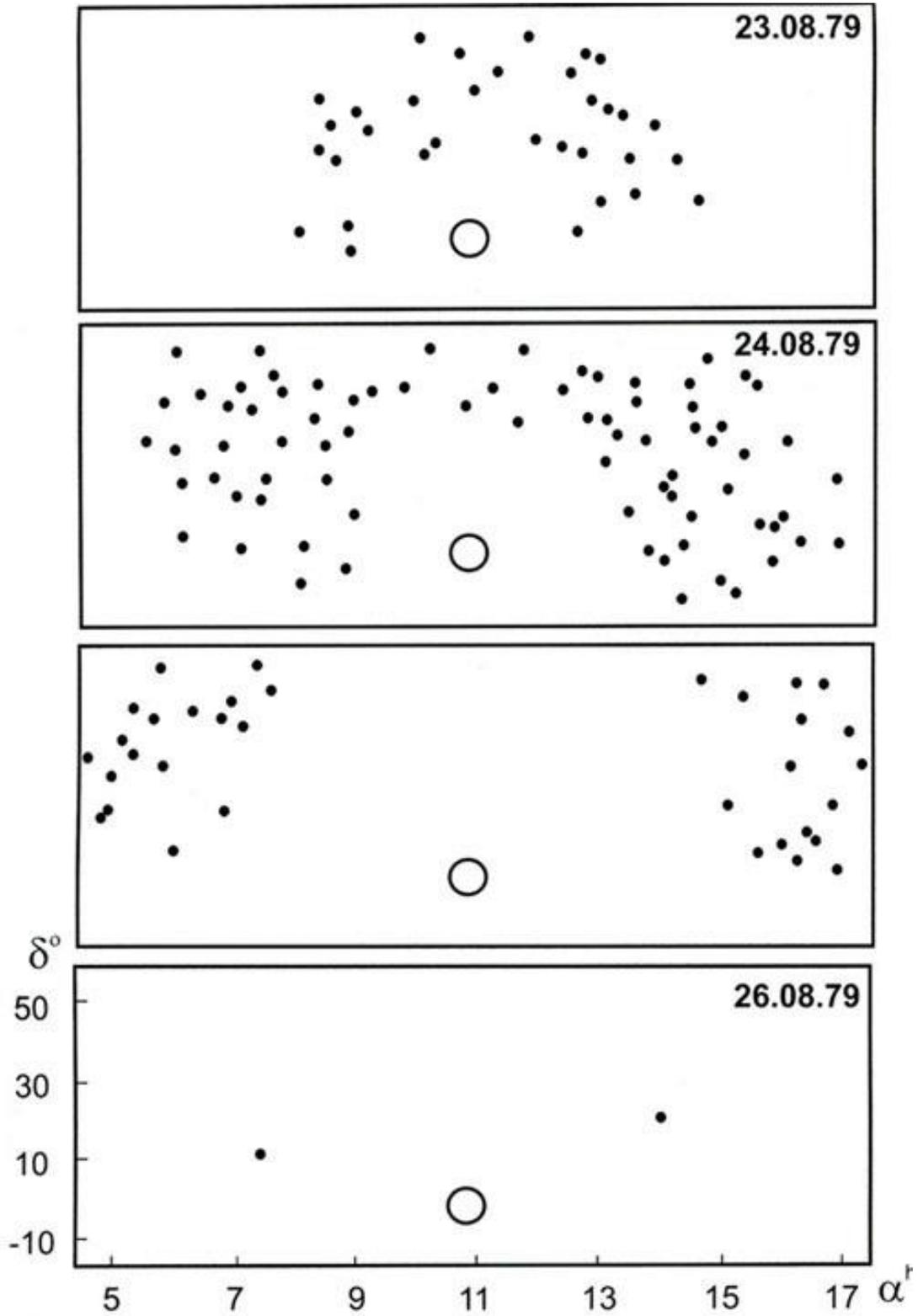
Турбулентность околосолнечной плазмы на высотах меньше  $R_{\odot}$  пока не исследована. Предложено использовать источники на Солнце и исследовать распространение радиоизлучения через солнечную корону [118].

Метод радиоастрономического картографирования межпланетной плазмы основан на наблюдениях мерцаний большого числа радиоисточников [110, 119]. С помощью этого метода, используя данные наблюдений на длительных временных интервалах, была исследована глобальная структура турбулентного солнечного ветра и ее эволюция в цикле солнечной активности [110, 120, 121]. Было, в

частности, показано, что наиболее сильным изменениям подвержены высокоширотные области солнечного ветра. Метод картографирования позволяет также детектировать и исследовать нестационарные явления в солнечном ветре, включая распространяющиеся крупномасштабные возмущения, связанные с активными процессами в солнечной короне [122]. На Рисунке 4 показан пример регистрации прохождения ударной волны через межпланетную плазму.

Анализируя мерцания радиоисточников, можно оценить состояние межпланетной плазмы и прогнозировать геофизические проявления солнечной активности (магнитные бури) с опережением примерно 1 сутки [123].

При наблюдениях на одиночных антеннах строятся карты распределения индексов мерцаний радиоисточников и отслеживается их временная динамика [110, 124-126]. Регистрация мерцаний на разнесенных радиотелескопах позволяет строить и анализировать двумерные карты распределения скорости солнечного ветра [127]. Известно [110], что индекс мерцаний зависит не только от абсолютного уровня флуктуаций концентрации плазмы солнечного ветра на масштабах порядка френелевского и распределения среды вдоль луча зрения, но и от угловой структуры радиоисточника. Поэтому, как правило, в наблюдениях используются наиболее сильные источники (в метровом диапазоне плотности потока 10 Ян и выше) с заранее известными свойствами. В последние годы предложена другая модификация метода картографирования, которая основана на измерениях флуктуаций плотности потока статистического ансамбля мерцающих радиоисточников и позволяет использовать слабые, предельно обнаружимые, с потоками до несколько десятых Ян, источники, повышая тем самым угловое разрешение метода [128, 129]. Для слабых мерцающих источников можно оценить лишь основные параметры мерцаний (средний индекс мерцаний по ансамблю источников, подсчет количества мерцающих источников за фиксированный промежуток времени). При этом ценность данных по сильным источникам сохраняется в силу возможности исследования свойств межпланетной среды и использования индивидуальных параметров мерцаний в качестве



**Рисунок 4.** Пример регистрации прохождения ударной волны через межпланетную плазму. Точками отмечены положения радиостанций, у которых наблюдалось увеличение величины индекса мерцаний в данный день по сравнению со значением индекса мерцаний в предыдущий день. Кругом отмечено положение Солнца [122].

калибровочных при поиске и детектировании распространяющихся возмущений, связанных с активными процессами в солнечной короне.

Возможность оценки скорости солнечного ветра с помощью временного спектра мерцаний была продемонстрирована в работе [125]. В работе [130] показано, что скорости, определенные в университете Нагойя методами разнесенного приема на частоте 327 МГц [131] и по временным спектрам мерцаний, близки друг к другу.

В работе [1] по наблюдениям мерцаний на частоте 327 МГц шести компактных источников получены указания на то, что имеется связь между спектральным индексом турбулентности и скоростью неоднородностей межпланетной плазмы для периодов высокой и низкой активности Солнца (22 цикл, март-декабрь 1986-1990 гг).

Во время минимума солнечной активности определяются два режима скорости солнечного ветра, быстрый ( $v > 600$  км/с) и медленный ( $v < 400$  км/с). Для быстрого ветра показатель степени (спектральный индекс турбулентности) больше, чем для медленного ветра. Для медленного солнечного ветра наблюдается увеличение значения спектрального индекса турбулентности с увеличением скорости солнечного ветра, для быстрого солнечного ветра значение спектрального индекса турбулентности почти не изменяется [1].

Во время максимума солнечной активности наблюдается, в основном медленный солнечный ветер. Для такого периода получено увеличение спектрального индекса турбулентности с увеличением скорости солнечного ветра [1].

Манохараном также были получены некоторые указания на то, что в период низкой солнечной активности на низких гелиоширотах (медленный солнечный ветер) значение спектрального индекса турбулентности ниже, чем на высоких гелиоширотах (быстрый ветер). Во время высокой активности Солнца спектральный индекс турбулентности остается почти постоянным на всех гелиоширотах.

## § 1.5.2. Угловые размеры радиоисточников

Временные характеристики межпланетных мерцаний зависят от уровня мелкомасштабной турбулентности плотности, скорости солнечного ветра и угловых размеров источников.

Существует несколько способов оценки углового размера радиоисточника. Интерферометрические наблюдения являются наиболее распространенным способом оценки углового размера источников, позволяющим оценить не только характерный размер источника, но и его форму. С понижением частоты интерферометрических наблюдений возникает ряд трудностей при обработке наблюдений. Усиливается влияние ионосферы и межпланетной плазмы, что укорачивает время когерентности и сдвигает координаты источников. Массовые интерферометрические наблюдения на больших базах проходят на частотах 1.4 ГГц и выше, хотя единичные эксперименты проводились даже на частотах 16-25 МГц на системе УРАН [132]. На частотах ниже 1.4 ГГц наблюдения источников методом межпланетных мерцаний являются хорошим способом оценки угловых размеров источников. Максимальный охват неба при наблюдениях межпланетных мерцаний достигается на частотах ниже 400 МГц.

Известно три способа извлечения углового размера источника из наблюдений его мерцаний на межпланетной плазме. Первый способ основан на исследовании зависимости наблюдаемого уровня мерцаний от элонгации (углового расстояния между направлением на Солнце и на источник) [133]. Вид зависимости и максимальная глубина модуляции связаны с угловым размером мерцающего компонента источника и его доли в полном потоке излучения. Недостатки этого метода: для анализа необходимы многодневные наблюдения источника в широком диапазоне элонгаций. Источник должен быть достаточно сильным, так как на больших элонгациях флуктуации плотности потока значительно уменьшаются. К тому же теоретические зависимости найдены в

предположении, что распределение солнечного ветра сферически симметрично, что не соответствует действительности (в минимуме солнечной активности наблюдается устойчивая бимодальная структура солнечного ветра, а во время максимума – частые выбросы корональной массы), поэтому оценки могут быть искажены. Во втором способе анализируется спектр мощности мерцаний: сравнивая теоретические модельные спектры мощности с полученным из наблюдений спектром, можно получить оценку углового размера источника [134, 135]. Достоинства метода заключаются в том, что для анализа не требуются длительный ряд наблюдений. Однако, есть и недостатки: данный способ применим для режима слабых мерцаний для сильных источников (достаточное отношение сигнал/шум). К тому же форма спектра мощности зависит от скорости солнечного ветра и от показателя турбулентности плазмы, то есть незнание точных параметров солнечного ветра может привести к ошибкам в оценке угловых размеров источников. В работе [136] описан способ оценки углового размера источника по наблюдениям в близкой к Солнцу области сильных мерцаний. Недостатки: необходимы наблюдения вблизи Солнца, в северной полусфере этому условию удовлетворяет лишь 10-20% от общего количества источников. Способ применим только для относительно сильных источников по причине резкого падения наблюдаемых флуктуаций плотности потока. Достоинства: не требуется предположение о показателе степени турбулентности плазмы. Необходимы наблюдения в относительно узкой области перехода от насыщенных мерцаний к слабым.

Привлекательность метода межпланетных мерцаний связана с его дешевизной и простотой. Например, для волны  $\lambda=3$  м интерферометр с разрешением 0.1" должен иметь базу 6000 км (почти радиус Земли). Для создания такого интерферометра необходимо построить две антенны и установить сложную регистрационную аппаратуру, тогда как для наблюдения мерцаний достаточно одной антенны и простая приемная аппаратура.

## § 1.6. Турбулентность солнечного ветра и альвеновские волны

Режимы турбулентности для зоны ускорения солнечного ветра и области сформировавшегося течения значительно отличаются. Однако различные параметры солнечного ветра имеют сходные энергетические спектры флуктуаций на всех расстояниях от Солнца. Фликер-спектр, вероятно, реликтовый и берет свое начало в нижних слоях солнечной короны. Вопрос о механизмах генерации остается открытым к настоящему времени. Одно из возможных объяснений – очень неоднородное распределение параметров плазмы в атмосфере Солнца [137-139]. Сильные пространственные неоднородности в атмосфере Солнца и вращение Солнца генерируют временные флуктуации [138, 139], которые в свою очередь генерируют фрактальные структуры, низкочастотные флуктуации которых наблюдаются далеко за пределами орбиты Земли [138].

Альвеновские волны были обнаружены в солнечном ветре, они определяют энергетику турбулентности и солнечного ветра в целом. Эти возмущения слабозатухающие и могут распространяться на значительные расстояния от Солнца. В зоне ускорения солнечного ветра альвеновская турбулентность слабая, при удалении от Солнца из-за неоднородности плазмы она усиливается [140]. В зоне ускорения солнечного ветра флуктуации плотности генерируются главным образом медленным магнитным звуком [140], который является следствием нелинейных распадных взаимодействий альвеновских волн. Следует отметить, что в области ускорения солнечного ветра отсутствует спектральное каскадирование энергии турбулентности, которое характерно для развитой турбулентности, при этом источник энергии распределен по всему энергетическому спектру.

В области сформировавшегося течения физика турбулентности принципиально изменяется. Причиной турбулентности остаются альвеновские волны, распространяющиеся от Солнца, но источник энергии локализован в крупномасштабной области волновых чисел. В этой области формируется инерционный интервал со спектрами колмогоровского типа.

Причины изменения режима турбулентности пока не ясны. Причиной смены режима турбулентности могут быть следующие факторы. Во-первых, при увеличении расстояния от Солнца увеличивается энергетический вклад быстрых магнитозвуковых волн, каскадные процессы могут доминировать, если уровень быстрых магнитозвуковых волн превышает уровень медленного звука [140]. Во-вторых, в сверхзвуковом и сверхальвеновском потоках взаимодействия встречных альвеновских волн и медленного магнитного звука могут быть подавлены, потому что встречные волны не могут достигнуть внешней области ускорения из области сформировавшегося потока.

Физическая модель турбулентности солнечного ветра, адекватно описывающая весь комплекс наблюдательных данных, полученных в результате локальных измерений и методами радиопросвечивания, пока не создана. Универсальные энергетические спектры турбулентности степенного типа формируются при спектральной перекачке энергии от внешнего масштаба турбулентности к мелким масштабам. Величина показателя степени при этом определяется конкретным механизмом спектральной перекачки. Чаще всего при описании турбулентности плазмы используются спектры с показателем  $n = 11/3$ , характерный для сильной турбулентности, или  $n = 7/2$ , слабая турбулентность. Впервые спектр с  $n = 11/3$  был найден Колмогоровым [141] из соображений размерности для несжимаемой жидкости. Спектры с тем же показателем для плазмы в магнитном поле для режима сильной турбулентности были теоретически получены Ту и Маршем [75]. Позднее была предложена и развивалась модель сильной анизотропной турбулентности, в которой двумерный энергетический спектр с  $n-1=8/3$  соответствовал распределению по

поперечным к магнитному полю волновым числам [142-144]. Вопрос о генерации флуктуаций плотности плазмы в условиях сильной турбулентности в достаточной мере пока не исследован. Энергетические спектры слабой турбулентности с  $n = 7/2$  и каскадами за счет распадных процессов были впервые получены Ирошниковым [145] и Кречнаном [146]. Трехволновые распадные процессы в плазме солнечного ветра также могут приводить к спектрам с  $n = 7/2$  [147] при сохранении спектрального потока энергии или с  $n > 7/2$  при частичной диссипации спектрального потока за счет поглощения [148]. Если основная энергия турбулентности связана с альвеновскими волнами, то нелинейная локальная генерация волн магнитозвукового типа естественным образом объясняет флуктуации плотности, причем энергетические спектры для флуктуаций магнитного поля и плотности оказываются одинаковыми [147, 148]. Отметим, что анизотропные спектры с  $n = 7/2$  могут реализовываться и для сильной турбулентности [149, 150]. Отметим также, что при учете перемежаемости турбулентности спектры с  $n = 11/3$  могут соответствовать локальным спектрам с  $n = 7/2$  [151].

По результатам наблюдений распределение частиц в солнечном ветре не является максвелловским. В работе [152] проанализированы различные типы неустойчивостей для распределения частиц, для плазмы солнечного ветра получены близкие к пороговым условия. Вероятно, что взаимодействие частиц с волновой турбулентностью формирует наблюдаемые функции распределения.

## **Глава 2. Наблюдения и первичная обработка данных**

Содержание Главы 2 частично основано на результатах совместных работ [130, 153-155] диссертанта.

Последние несколько лет на радиотелескопе БСА ФИАН ведутся наблюдения межпланетных мерцаний в режиме мониторинга, что позволило накопить обширный наблюдательный материал в различные периоды солнечной активности. Анализируя имеющиеся данные, можно получить информацию о скорости неоднородностей межпланетной плазмы, спектральном индексе турбулентности и об эволюции этих параметров. Разработана методика оценки параметров турбулентности межпланетной плазмы с помощью временных спектров мощности мерцаний сильных компактных радиоисточников. Подробнее о межпланетных мерцаниях и методике написано ниже.

### **§ 2.1. Основы метода межпланетных мерцаний**

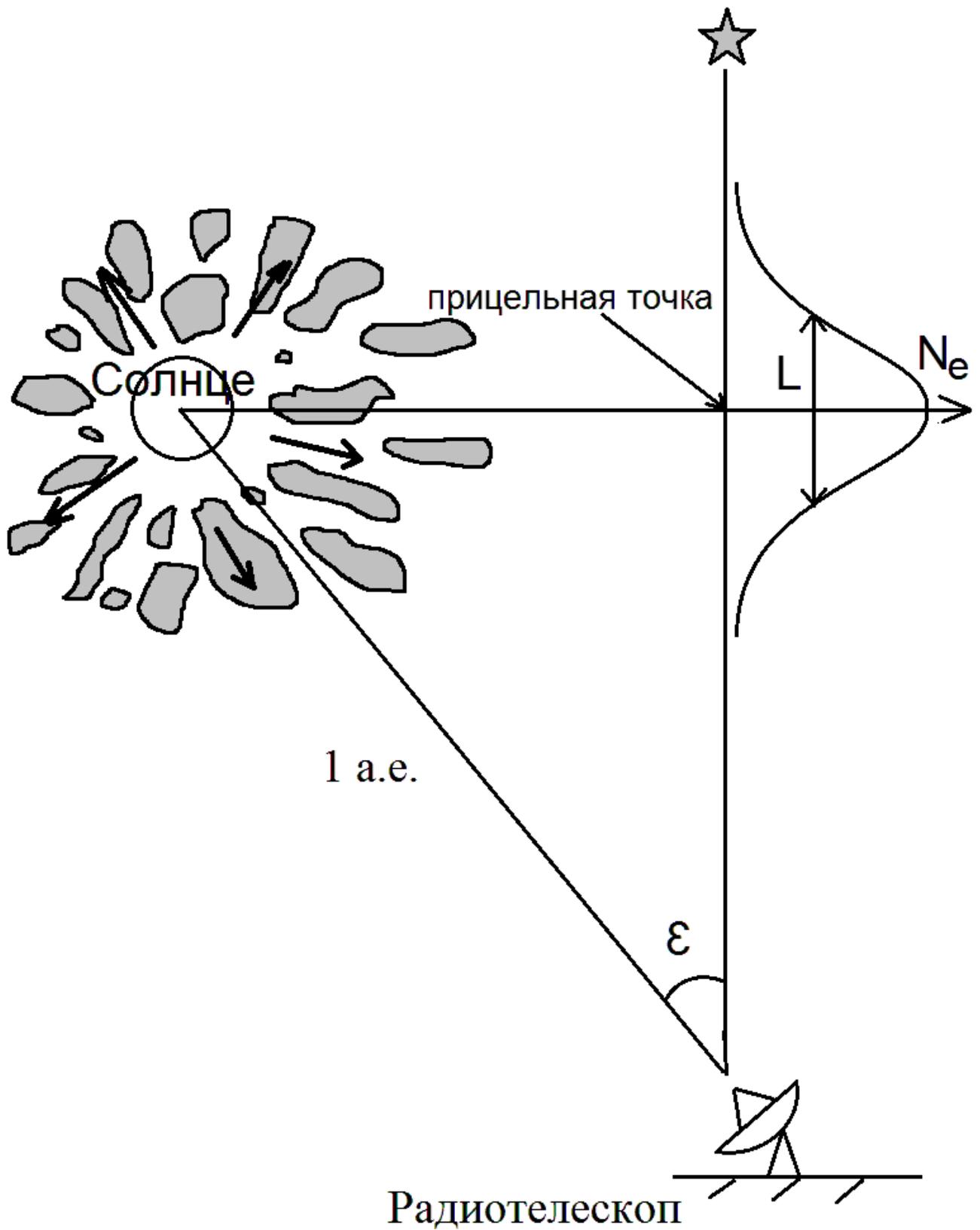
Межпланетные мерцания (IPS – interplanetary scintillation) были обнаружены в 1964 г. [156] и с тех пор широко используются для изучения свойств межпланетной плазмы (МПП) [157] и угловой структуры источников [134, 135].

Мерцания обусловлены дифракцией радиоволн, приходящих от удаленного компактного радиоисточника, на неоднородностях плотности межпланетной плазмы френелевского масштаба (для радиоволн метрового диапазона френелевский масштаб составляет несколько сотен километров). Пространственные спектры турбулентности в этой области масштабов являются степенными, но для 100-км масштабов часто используется термин «мелкомасштабные неоднородности», подчеркивающий отличие в несколько порядков от внешнего энергосодержащего масштаба турбулентности.

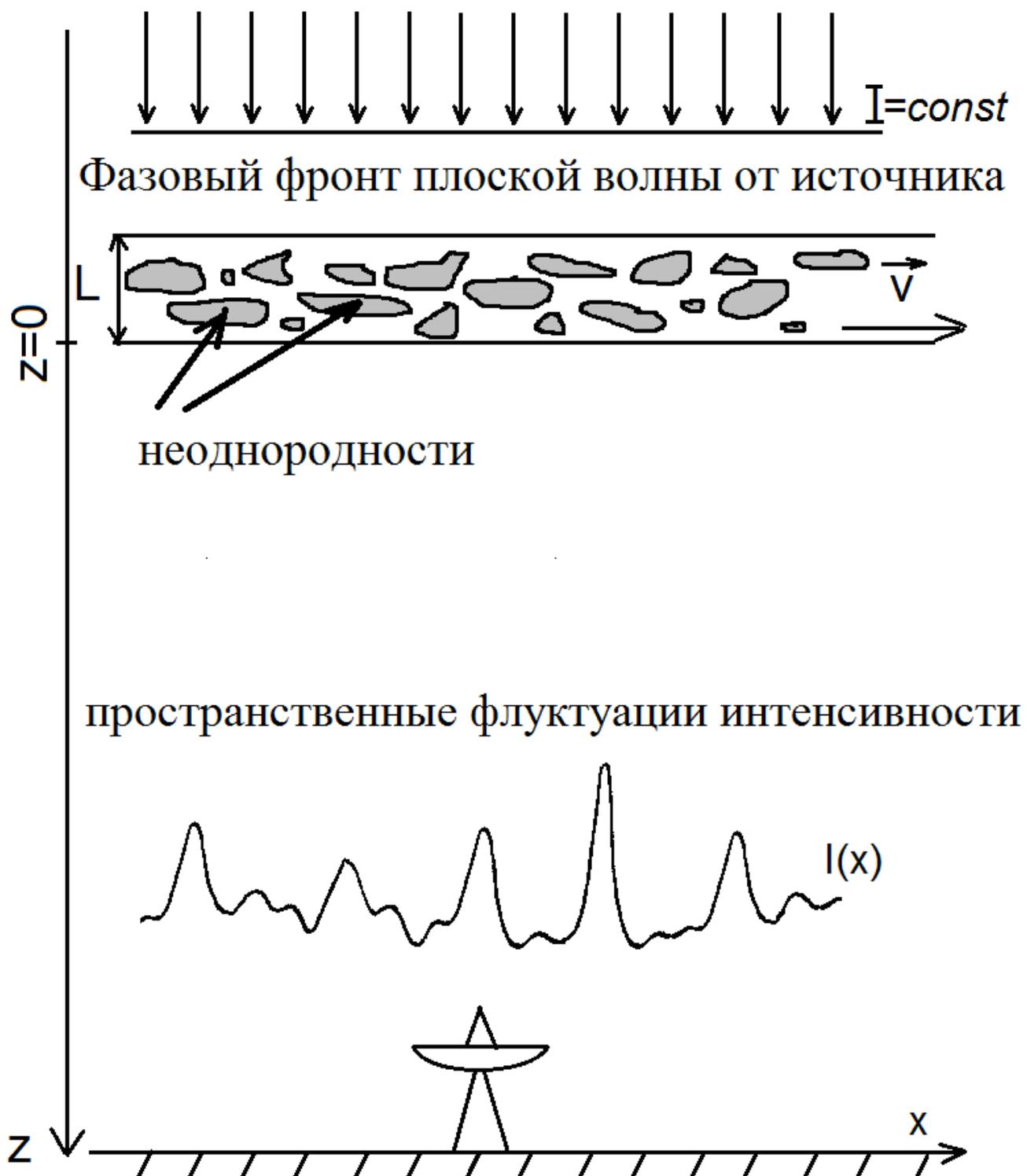
Известно, что плотность МПП в области сформировавшегося течения уменьшается с увеличением расстояния от Солнца как  $1/r^2$ , где  $r$  – расстояние от Солнца [158], поэтому распределение электронной плотности вдоль луча зрения будет таким, как показано на Рисунке 5. Из рисунка видно, что при малых элонгациях ( $\varepsilon < 50^\circ$ ) (элонгация - угловое расстояние источника от Солнца) на луче зрения можно выделить некоторую область, толщиной  $\sim L$  значительно меньше 1 а. е., где плотность МПП максимальна. Именно этот слой вносит основные возмущения в проходящие радиоволны. Поскольку внутри выделенного слоя модулируется только фаза волны и практически не меняется амплитуда, то для описания распространения радиоволн в МПП можно воспользоваться моделью фазового экрана.

Современная теория распространения волн в случайно неоднородных средах, изложена в работах [90, 159, 160]. В первые годы наблюдений при интерпретации данных использовалась теория «фазового экрана» [161, 162].

На Рисунке 6 представлена схема прохождения плоской волны через фазовый экран в одномерном случае. В среде меняется скорость распространения волны из-за изменения показателя преломления и удлиняется ее путь из-за преломления направления распространения волнового фронта. Вследствие этого на выходе экрана плоская волна в каждой точке  $x$  будет иметь случайный набег фазы  $\Phi(x)$  относительно невозмущенной волны. Это приводит к флуктуациям интенсивности излучения в дальней зоне, где находится наблюдатель.



**Рисунок 5.** Солнечный ветер и распределение средней плотности электронов вдоль луча зрения. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.



**Рисунок 6.** Схема фазового экрана. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

Предполагается, что все рассматриваемые случайные процессы полностью задаются их автокорреляционными функциями. Так, флуктуации интенсивности излучения характеризуются автокорреляционной функцией  $M(r)$ :

$$M(r) = \langle I(x)I(x+r) \rangle, \quad (1)$$

где  $I(x)$  - измеряемая плотность потока в зависимости от времени,  $r$  - временное смещение.

Модель фазового экрана недостаточна, так как не учитывает протяженность среды и изменение параметров по лучу зрения.

Уровень мерцаний зависит от углового размера источника. Если проекция источника на эффективно модулирующую область велика по сравнению с размерами неоднородностей, мерцания подавляются. Поэтому для изучения IPS используют наблюдения компактных (<1") радиоисточников, таких как активные ядра галактик.

При анализе мерцаний радиоисточников на неоднородностях МПП важнейшей измеряемой величиной является индекс мерцаний

$$m^2 = M(0) = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (2)$$

где  $I$  - измеряемая плотность потока в зависимости от времени, а  $\langle I \rangle$  - ее среднее значение.

Значение индекса мерцаний зависит от параметров МПП, в частности от флуктуаций электронной плотности (т.е. существует зависимость индекса мерцаний от элонгации). В случае прохождения выброса корональной массы (выброс вещества из солнечной короны, обычно происходящий после вспышек) распределение электронной плотности МПП также существенно меняется.

Индекс мерцаний с достаточной точностью можно оценить только для сильных источников (когда плотность потока источника существенно превосходит шумы).

Неоднородности МПП движутся от Солнца со средней скоростью  $v \approx 400$  км/с (в районе Земли). С такой же скоростью движется на Земле дифракционная картина, созданная неоднородностями МПП, а радиотелескоп регистрирует изменения интенсивности со временем. Как известно, временной спектр мерцаний зависит от пространственного спектра флуктуаций плотности плазмы, скорости неоднородностей относительно луча зрения, распределения уровня турбулентности по лучу зрения и углового распределения яркости источника. В режиме слабых мерцаний для временного спектра справедливо соотношение [125, 134]

$$P(f) = 4\lambda^2 \int \frac{A(z)dz}{v_{\perp}(z)} \int dq_{\perp} \Phi_e(q) \sin^2 \left( \frac{q^2 z}{2k} \right) F^2 \left( \frac{qz}{k} \right) \Big|_{q_{\parallel} = \frac{2\pi f}{v_{\perp}(z)}}, \quad (3)$$

где  $f$  - временная частота,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число,

ось  $OZ$  – это направление вдоль луча зрения и  $z=0$  находится в прицельной точке,

$$A(z) = \frac{A_0}{(z^2 + r_0^2)^2} \sim \frac{1}{r_0^4}, \quad A_0 = 5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2, \quad r_0 = \sin \varepsilon \cdot 1AU, \quad v_{\perp}(z) = v \cos \varphi = v \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + z^2}} -$$

проекция скорости солнечного ветра в точке  $(r, z)$  на картинную плоскость,  $v$  -

скорость солнечного ветра ( $v \approx 400$  км/с в окрестности Земли),  $q$  -

пространственная частота,  $q_{\parallel}$  - составляющая пространственной частоты вдоль

луча зрения,  $q_{\perp}$  - составляющая пространственной частоты в картинной

плоскости,  $q = \sqrt{q_{\perp}^2 + q_{\parallel}^2}$ ,  $\Phi_e(q) = Cq^{-n}$  - пространственный спектр флуктуаций

электронной плотности МПП,  $n$  - показатель степени трехмерного спектра

мощности турбулентности,  $F(q) = \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \iint d^2\theta \exp[-ikq\theta] I(\theta)$  - пространственный

спектр радиоисточника, а  $I(\theta)$  - распределение яркости по источнику.

Зависимость  $A(z)$  в (3) соответствует предположениям сферической симметрии, а также не зависящих от расстояния до Солнца значениях скорости солнечного ветра (установившееся течение) и относительного уровня турбулентности.

Таким образом, статистические характеристики флуктуаций интенсивности излучения определяются статистическими характеристиками среды (уровень и форма спектра мелкомасштабной турбулентности плотности, скорость солнечного ветра) и распределением яркости по источнику.

## § 2.2. Радиотелескоп БСА ФИАН

Радиотелескоп БСА ФИАН функционирует на основе большой сканирующей антенны (Рисунок 7). Антенна БСА Пуштинской радиоастрономической обсерватории (АКЦ ФИАН), введенная в эксплуатацию в 1974 г., представляет собой плоскую двумерную эквидистантную фазирuemую по одной координате решетку с геометрической площадью  $\sim 72000 \text{ м}^2$  [163]. Эффективная площадь антенны с усилителями  $A_0 = 28.5 \cdot 10^3 \text{ м}^2$  в направлении на зенит. Ее размеры 187x384 метров в направлениях Восток-Запад и Север-Юг, соответственно. Антенна состоит из вибраторов, собранных в 256 рядов по 64 диполя в каждом (всего 16384 вибратора), ориентированных в направлении Восток-Запад. Антенна имеет две независимые диаграммы направленности. Каждая диаграмма направленности имеет одновременно 16 лучей, перекрывающих около восьми градусов по склонению. Для наблюдения межпланетных мерцаний используется частота наблюдений 111.5 МГц (2.7 м),



**Рисунок 7.** Радиотелескоп БСА ФИАН [165].

полоса приема 600 кГц, постоянная времени 0.1 с [164]. Диаграмма направленности радиотелескопа БСА ФИАН установлена на небесный меридиан и неподвижна относительно поверхности Земли, поэтому источник проходит через максимум диаграммы направленности в момент кульминации с учетом известной поправки за наклон антенны [164].

Так как склонение Солнца в течение года изменяется от  $-22^\circ$  (зимой) до  $22^\circ$  (летом), оптимальные элонгации для наблюдений мерцающих источников достигаются в разных областях неба. Поэтому для мониторинга обычно выбираются две площадки с координатами по склонению от  $3.5^\circ$  до  $12.5^\circ$  (с марта по октябрь) и координатами от  $28.5^\circ$  до  $35^\circ$  (с октября по март).

После недавней модернизации радиотелескопа наблюдения проводятся в режиме мониторинга на центральной частоте 110.25 МГц с постоянной времени 0.1 с в шести спектральных каналах с суммарной шириной 2.5 МГц.

Сигнал от всех спектральных каналов суммируется. Модернизированная диаграмма направленности радиотелескопа БСА ФИАН насчитывает 96 лучей, перекрывающих область склонений от  $-8^\circ$  до  $42^\circ$ .

На сегодняшний день БСА является самым высокочувствительным радиотелескопом в мире в метровом диапазоне длин волн.

### § 2.3. Методика обработки наблюдений

Для исследования мерцающих источников существует несколько методик. Для сильных источников можно определить индекс мерцаний и построить спектр мощности. Эти параметры дают информацию об электронной плотности, угловом размере источника, показателе степени турбулентности МПП, скорости неоднородностей МПП. Для слабых источников применяется статистический метод, строится структурная функция и оценивается коэффициент асимметрии.

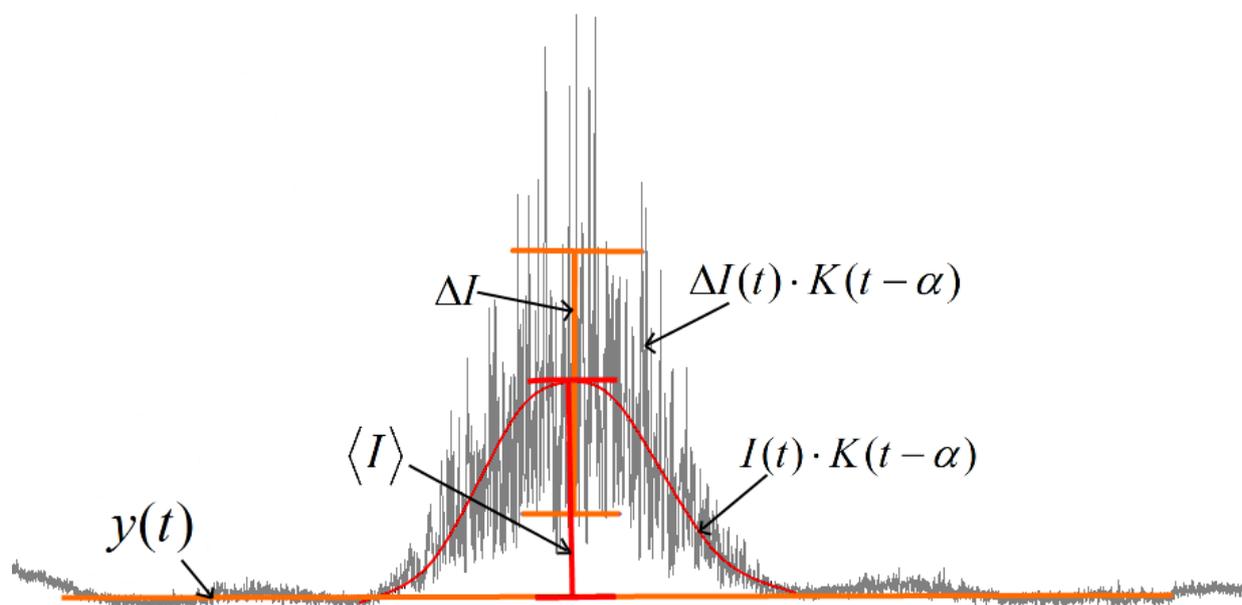
В данной работе рассматриваются сильные источники. Обработка наблюдений базируется на методиках, изложенных в работах [134, 135, 166-168].

Так, согласно методике [167], сигнал (Рисунок 8) на выходе радиометра представляется следующим образом:

$$u(t) = y(t) + I(t) \cdot K(t - \alpha) + \Delta I(t) \cdot K(t - \alpha) + n(t), \quad (4)$$

где

1.  $y(t)$  - нулевой уровень записи. В наших наблюдениях за время записи источника ( $t \approx 15^m$ ) он хорошо аппроксимируется прямой линией.
2.  $I \cdot K(t - \alpha)$  - вклад «спокойного» (немерцающего) источника. Здесь  $I$  - интегральная плотность потока источника,  $K$  - диаграмма направленности антенны в Е – плоскости,  $\alpha$  - координата (прямое восхождение) источника.
3.  $\Delta I(t) \cdot K(t - \alpha)$  - флуктуирующая составляющая потока, где  $\Delta I(t)$  - флуктуации плотности потока источника, вызванные эффектом мерцаний.
4.  $n(t)$  - шумы.



**Рисунок 8.** Входной сигнал от мерцающего радиоисточника 3С 48. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

Для анализа наблюдений нужно получить оценки параметров  $I$ ,  $\langle \Delta I^2 \rangle$  и временного спектра мерцаний.

Сигнал источника, принятый антенной, автоматически оцифровывается. Наибольшие значения сигнала приходятся на время прохождения источника через небесный меридиан (максимум диаграммы направленности антенны). В окрестности максимума отношение сигнал/шум максимально. Из-за влияния ионосферы или по другим причинам положение источника на записи может немного сместиться, поэтому необходимо уточнять реальное положение источника.

1. Нахождение центра и нулей источника на записи ведется по следующей схеме:

А) Прохождение источника через диаграмму направленности антенны ограничено по времени и составляет примерно 7 мин по нулевому уровню (точнее  $\frac{425^s}{\cos \delta}$ , где  $\delta$  - склонение источника). Проводим усреднение исходного сигнала по временным интервалам длительностью примерно 30 с (точнее  $\frac{425^s}{16 \cos \delta}$ ), чтобы максимально подавить шумы и мерцания, но сохранить информацию о прохождении источника через диаграмму направленности.

Б) Диаграмма направленности антенны БСА ФИАН имеет вид  $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$  (см Рисунок 9). Проводим свертку массива усредненного сигнала с диаграммой направленности на интервале  $[-\pi; \pi]$ . Получаем массив свертки  $S$ .

В) Находим максимум свертки  $s_i$ . Для более точного определения центра записи источника вписываем параболу в точки  $(i-1, s_{i-1})$ ,  $(i, s_i)$  и  $(i+1, s_{i+1})$ . Вершину параболы мы считаем центром источника на записи.

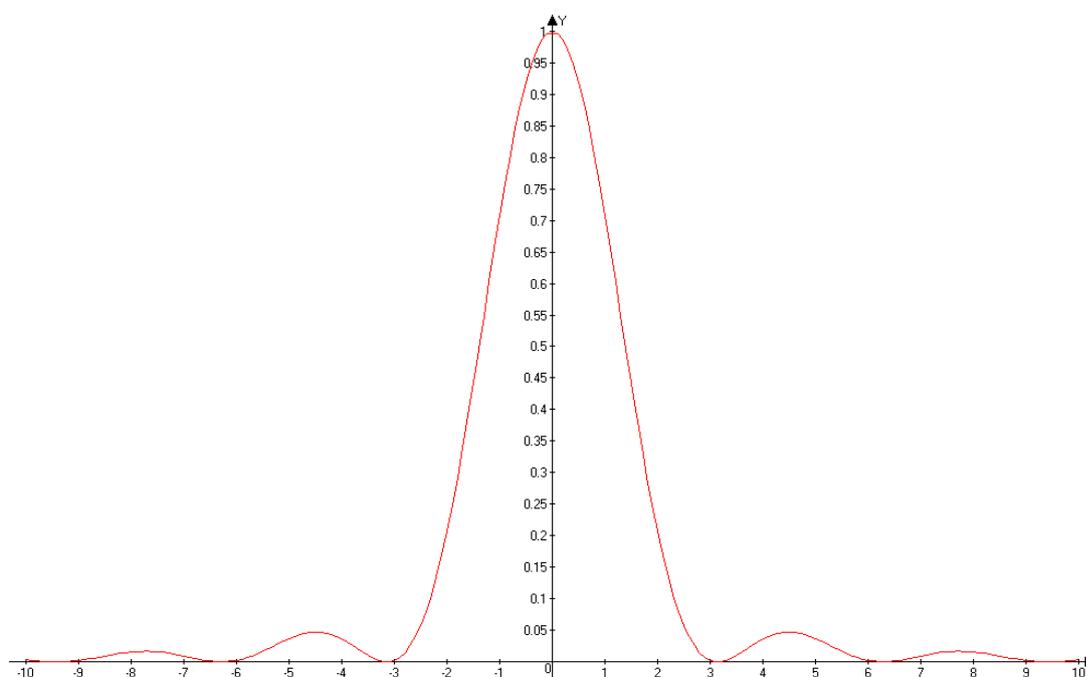
Г) Зная время записи источника, находим координаты нулей: нули отстоят от центра на половину времени записи источника влево и вправо.

2. Определение интегрального потока  $\langle I \rangle$  и нулевого уровня  $I_0$ . Теперь находим среднее значение сигнала на интервале усреднения в окрестностях нулей ( $\min_1$  и  $\min_2$ ) и центра ( $\max$ ). Так как нулевой уровень  $y(t)$  можно аппроксимировать прямой, в окрестности центра  $y(t) = I_0 = \frac{\min_1 + \min_2}{2}$  и

$$\langle I \rangle = \max - I_0. \quad (5)$$

Получив оценку  $I_0$ , вычитаем из исходного сигнала в окрестности центра записи нулевой уровень и образуем новый числовой массив, который будем использовать для вычисления индекса мерцаний.

3. Определение индекса мерцаний. Положим, что шумы всех видов пренебрежимо малы по сравнению с величиной мерцаний. С целью повышения надежности результатов мы используем для обработки только запись центральной

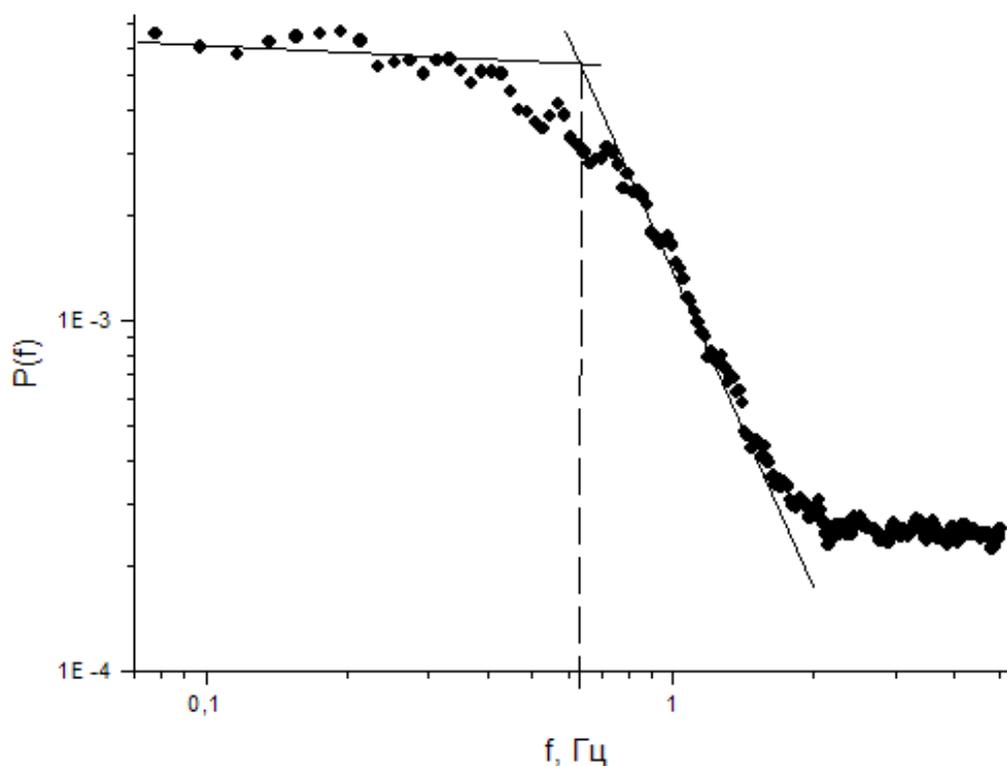


**Рисунок 9.** Диаграмма направленности БСА ФИАН. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

части диаграммы антенны, и длина обрабатываемой записи равна двум минутам. Вычисление индекса мерцаний проводим по формуле (2).

Записи с низким отношением сигнал/шум, импульсными помехами и ступеньками не обрабатываем.

4. Получение спектральной оценки. Из наблюдений мы получаем массив мерцаний, который является нестационарным случайным процессом. Однако это процесс с конечной энергией, и для него можно построить спектральную оценку. Для вычисления спектров используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Используя спектр мощности мерцаний, легко получить оценку сигнал/шум. На Рисунке 10 на низких частотах близкий к плоскому участок спектра характеризует уровень сигнала, а плоский участок на высоких частотах – уровень шумов.



**Рисунок 10.** Вписывание прямых во временной спектр мерцаний источника ЗС 48. Совместный результат диссертанта из работы [130].

5. Оценка скорости солнечного ветра. В первом приближении можно вписать прямые методом наименьших квадратов, как показано на Рисунке 10. Точка излома дает информацию о скорости солнечного ветра.

Спектр мерцаний для точечного источника имеет вид (например, см. обзор [110])

$$P(f) = A \int \sin^2 \left( q^2 \frac{z}{2k} \right) q^{-n} \delta(qz) \delta(2\pi f - \bar{q}\bar{v}) = A \int \sin^2 \left\{ \left[ q_y^2 + \left( \frac{2\pi f}{v} \right)^2 \right] a_\Phi^2 \right\} \cdot \left[ q_y^2 + \left( \frac{2\pi f}{v} \right)^2 \right]^{\frac{n}{2}} dq_y,$$

где  $f$  - временная частота,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $v$  - скорость солнечного ветра ( $v \approx 400$  км/с в окрестности Земли),  $q$  - пространственная частота, ось  $OZ$  - это направление вдоль луча зрения,  $q_y$  - составляющая пространственной частоты вдоль луча зрения (или в картинной плоскости),  $A$ -const,  $n$  - показатель степени трехмерного спектра турбулентности.

Тогда

$$P_{НЧ}(f \rightarrow 0) = A \int \sin^2 \left( q_y^2 a_\Phi^2 \right) q_y^{-n} dq_y = \left[ \xi = q_y a_\Phi \right] = 2Aa_\Phi^{n-1} \int_0^\infty \sin^2 \xi^2 |\xi|^{-n} d|\xi| = Aa_\Phi^{n-1} I_1,$$

$$\text{где } I_1 = 2 \int_0^\infty \sin^2 \xi^2 |\xi|^{-n} d|\xi|.$$

2. Высокие частоты:  $\left( \frac{2\pi f}{v} \right) \gg a_\Phi^{-1}$ . В этом случае  $\sin^2 \left( q^2 \frac{z}{2k} \right) \approx \frac{1}{2}$ .

$$P_{ВЧ}(f) = \frac{1}{2} A \int \left[ q_y^2 + \left( \frac{2\pi f}{v} \right)^2 \right]^{\frac{n}{2}} dq_y = \left[ \xi = \frac{q_y v}{2\pi f} \right] = \frac{1}{2} A \left( \frac{2\pi f}{v} \right)^{n-1} \int_{-\infty}^{+\infty} [1 + \xi^2]^{\frac{n}{2}} d\xi = A \left( \frac{2\pi f}{v} \right)^{-n+1} I_2,$$

$$\text{где } I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [1 + \xi^2]^{\frac{n}{2}} d\xi.$$

Стыковка:  $P_{НЧ} = P_{ВЧ}$ .

$$AI_1 a_\Phi^{n-1} = AI_2 \left( \frac{2\pi f}{\nu} \right)^{-n+1} \quad \text{и} \quad AI_1 a_\Phi^{n-1} = AI_2 \left( \frac{\nu}{2\pi f} \right)^{n-1}.$$

Отсюда

$$\nu = 2\pi f_0 a_\Phi \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^{\frac{1}{n-1}} = 2\pi f_0 \sqrt{\frac{z_0 \cos \varepsilon}{2k}} \gamma = 2\pi f_0 \sqrt{\frac{z_0 \cos \varepsilon}{2 \frac{2\pi}{\lambda}}} \gamma = 2\pi f_0 \sqrt{\frac{\lambda z_0 \cos \varepsilon}{4\pi}} \gamma = f_0 \sqrt{\pi \lambda z_0 \cos \varepsilon} \gamma,$$

где  $\gamma = \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^{\frac{1}{n-1}}$ ,  $n = 3.6$ .

Таким образом, получаем конечную формулу для определения скорости неоднородностей солнечного ветра

$$\nu = \frac{f_0}{1.04} \cdot (\pi \lambda z_0 \cos \varepsilon)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где  $\nu$  - скорость солнечного ветра,  $f_0$  - частота излома спектра,  $\lambda$  - длина волны наблюдения,  $z_0 \cos \varepsilon$  - расстояние до рассеивающего слоя ( $z_0 = 1a.e.$ ),  $\varepsilon$  - элонгация источника.

В дальнейшем мы будем использовать численное моделирование спектров мощности для оценки скорости солнечного ветра.

## § 2.4. Анализ временны'х спектров мерцаний

Рисунок 11 иллюстрирует геометрию эксперимента по наблюдению мерцаний. На Рисунке 11 ось  $OZ$  – направление на источник,  $z = 0$  – прицельная точка (ближайшая к Солнцу точка на оси  $OZ$ ),  $r_0$  – расстояние от Солнца до

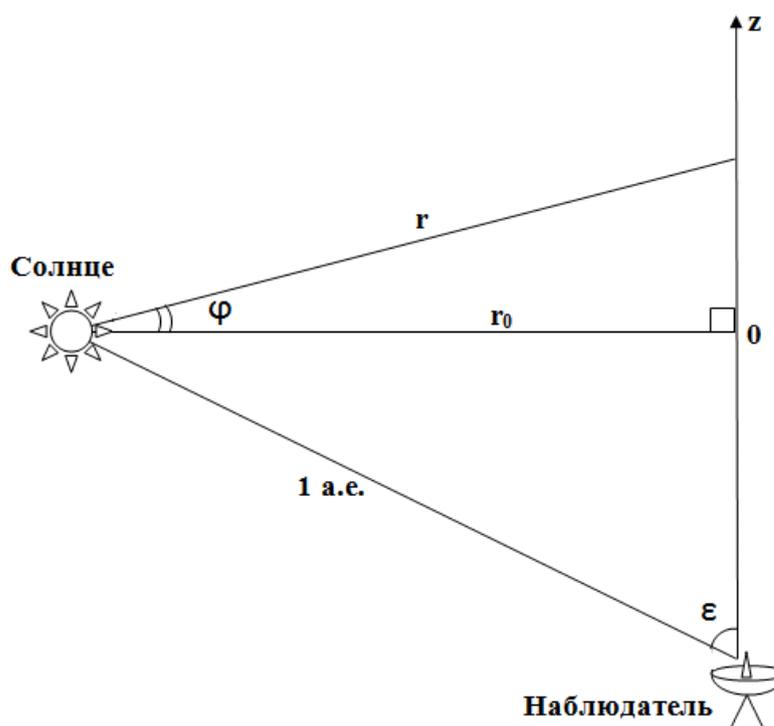
прицельной точки, 1 а.е. – среднее расстояние между Землей (наблюдателем) и Солнцем,  $\varepsilon$  – элонгация (угловое расстояние между направлениями на Солнце и на источник),  $r$  – расстояние между Солнцем и точкой на  $OZ$  (гелиоцентрическое расстояние),  $\varphi$  – угол между  $r$  и  $r_0$ .

Временной спектр мощности IPS  $P(f)$  вычислялся как преобразование Фурье автокорреляционной функции  $B_1(\tau)$ :

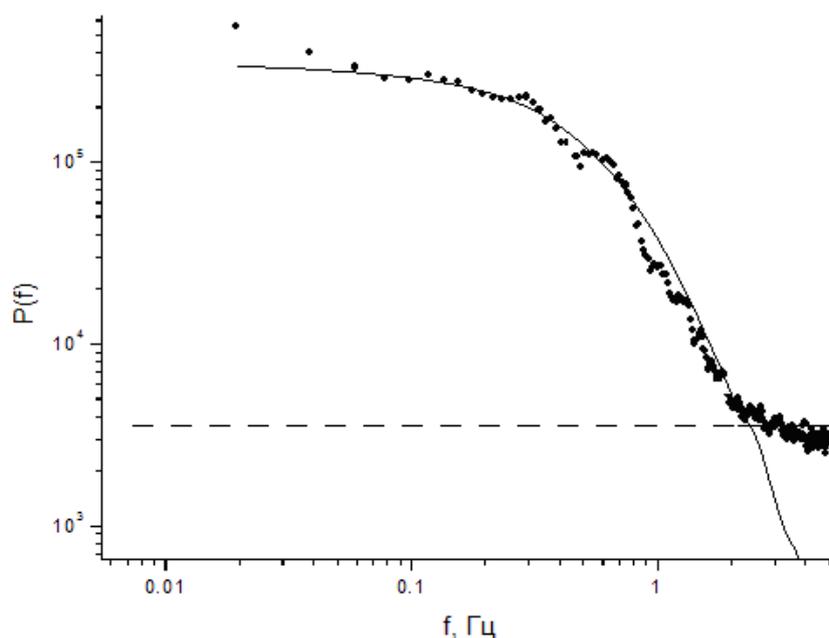
$$P(f) = \int B_1(\tau) \exp(2\pi i f \tau) d\tau, \quad (7)$$

$$B_1(\tau) = \langle \delta I(t) \delta I(t + \tau) \rangle,$$

где  $I(t)$  - измеряемая плотность потока, а  $\delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$  - её временные флуктуации. Типичные спектры мощности IPS имеют плато на низких частотах и достаточно быстро убывают на высоких частотах. На Рисунке 12 показан пример



**Рисунок 11.** Иллюстрация наблюдений мерцаний источника на МПП (в случае сферического распределения МПП). Совместный результат диссертанта из работы [154].



**Рисунок 12.** Пример спектра мощности источника ЗС 48 (точки) и вписанный теоретический спектр мощности (сплошная линия). Уровень шумов указан штриховой линией. Совместный результат диссертанта из работы [154].

спектра мощности источника ЗС 48. Некоторый подъем спектральной плотности на частотах менее 0.04 Гц связан, по-видимому, со вкладом ионосферных мерцаний. Уплотнение спектра на частотах более 2 Гц обусловлено выходом на уровень шумов, который отображен на Рисунке горизонтальной штриховой линией.

Численное моделирование временных спектров мощности IPS (уравнение (3)) для источников различных угловых размеров проводилось в следующих предположениях:

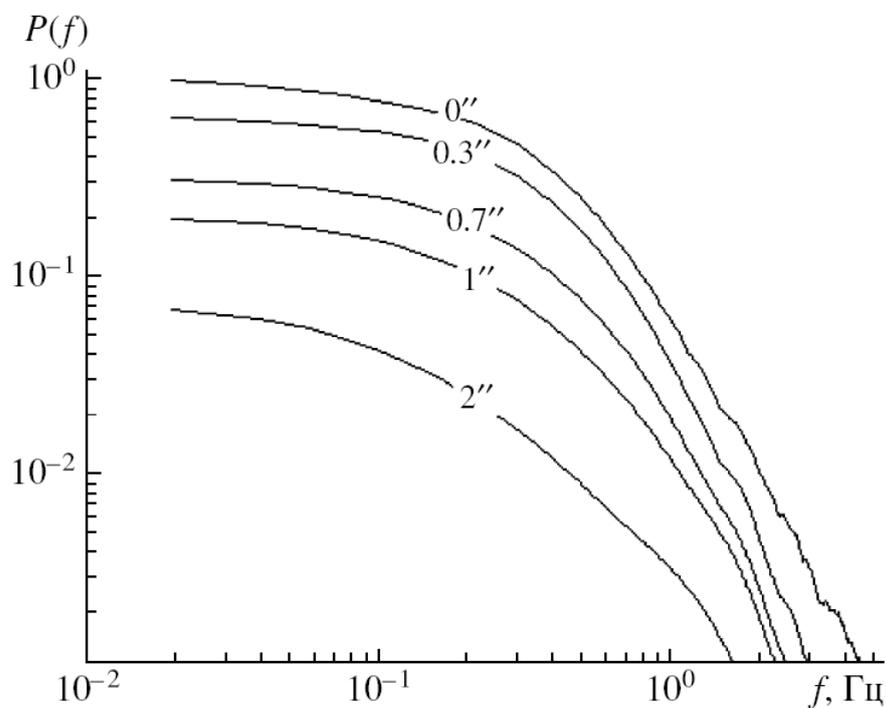
- 1) трехмерный пространственный спектр турбулентности МПП является степенным,  $\Phi_e(q, q_z=0) = C q^{-n}$ , где  $C$  – структурная константа;
- 2) уровень турбулентности плотности зависит от гелиоцентрического расстояния  $r$  по степенному закону  $C \sim r^{-4}$ ,  $C = C_0 (1 \text{ AU}/r)^4$ ;
- 3) скорость солнечного ветра  $v$  постоянна и направлена вдоль радиуса;

4) распределение яркости по источнику гауссовское, сферически- симметричное  $I(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}\right)$ , где  $\theta_0$  - радиус источника по уровню  $\frac{1}{\sqrt{e}}$ .

На Рисунке 13 приведены результаты численных расчетов. Из Рисунка видно, что на высоких частотах заметно влияние углового размера источника. Следовательно, чем больший участок спектра, полученного из наблюдений, доступен для анализа, тем надежнее можно измерить угловые размеры радиоисточника. По этой причине для анализа используются записи с хорошим отношением сигнал/шум.

Модель, используемая в численных расчетах, имеет 4 свободных параметра: абсолютный уровень турбулентности  $C_0$ , скорость солнечного ветра  $v$ , спектральный индекс турбулентности  $n$  и размер радиоисточника  $\theta_0$ .

Рассмотрим, как изменения этих параметров влияют на наблюдаемый экспериментальный спектр мощности. Согласно описанию подынтегрального выражения в формуле (3),  $C_0$  – это константа. Следовательно, она может быть вынесена вместе с другими константами выражения (3) за пределы интеграла.



**Рисунок 13.** Теоретические спектры мерцаний для источников разных угловых размеров ( $n = 3.6$ ,  $v = 400$  км/с). Совместный результат диссертанта из работы [154].

В конечном счете, эти константы определяют абсолютную высоту теоретического спектра мощности. При моделировании уровень плоского участка (плато) экспериментального временного спектра мощности источника может быть привязан к уровню плато теоретического (модельного) спектра и, таким образом, константа будет исключена из дальнейшего рассмотрения. Изменение скорости солнечного ветра сдвигает спектр мощности как целое вдоль оси частот. Форма модельного спектра при этом не изменяется, но удлиняется плоский участок спектра мощности на низких частотах. Форма модельного спектра мощности на степенном участке спектра после излома зависит как от угловых размеров источника, так и от спектрального индекса турбулентности. Предельный угловой размер, определенный по наблюдениям мерцающих источников на 102 МГц ( $\theta > 0.05''$ ), обусловлен рассеянием в межзвездной среде [169].

Экспериментальный спектр мощности имеет конечное отношение сигнал/шум. По этой причине, изменяя модельные размеры источника и параметр турбулентности, можно подобрать такие пары  $\theta_0$  и  $n$ , что в пределах ошибок экспериментального спектра будут возможны наборы таких пар. Мы не знаем *a priori* ни углового размера мерцающего радиоисточника, ни спектрального индекса турбулентности. Тем не менее разумно предположить, что угловые размеры источника не изменяются день ото дня. Предположим, что источник излучения находится на красном смещении  $z = 0.1$ . Легко оценить, что линейный размер мерцающего источника, соответствующий угловому размеру  $0.1''$  на  $z = 0.1$ , будет равен 200 пк. Следовательно, характерное время изменения размеров такого объекта не менее 600 лет (подавляющая часть наблюдаемых источников во Вселенной имеют большие красные смещения). Эта оценка позволяет нам считать угловой размер источника постоянным, по крайней мере, на промежутке времени в сотни лет.

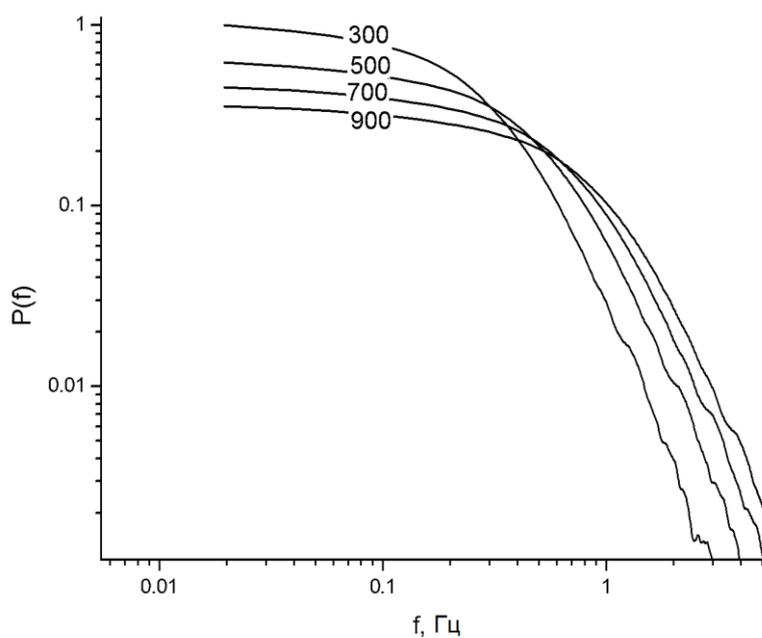
Первый шаг при моделировании экспериментального спектра мощности заключается в том, что мы принимаем модель среды с показателем степени

турбулентности  $n = 3.6$  и определяем угловой размер источника. Скорость солнечного ветра не фиксируется.

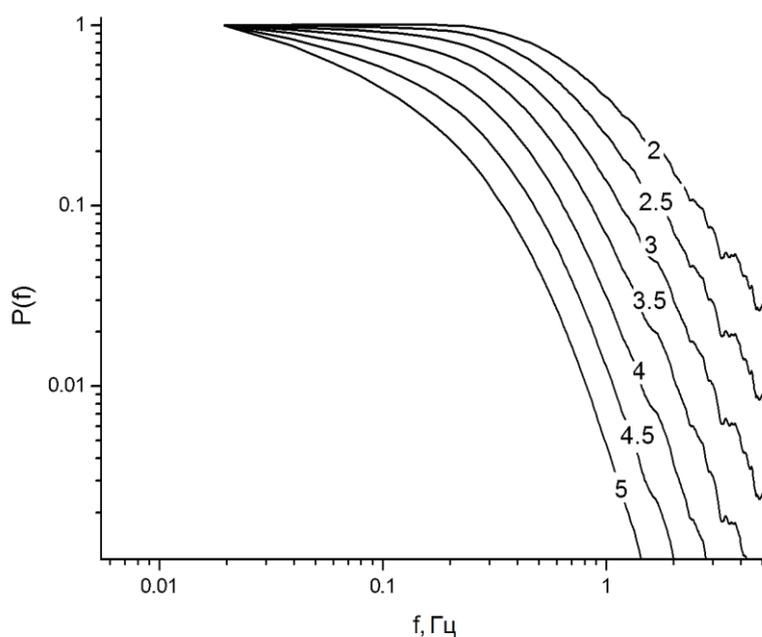
Значение  $n = 3.6$  в среднем согласуется с данными наблюдений (см. обзор [110]). Временной спектр источника, полученный из наблюдений, после вычитания шумов сравнивается с набором теоретических спектров. Для аппроксимации экспериментального спектра теоретическим используются точки, расположенные выше уровня шумов, поэтому для повышения точности определения свободных параметров используются записи с хорошим ( $>30$ ) отношением сигнал/шум. Это позволяет провести анализ для 100 -150 точек из спектра. Угловой размер источника выбирается по наилучшему совпадению теоретического и экспериментального спектра при подгонке методом наименьших квадратов. Произведя усреднение измеренных в отдельных сеансах угловых размеров, получим оценку углового размера источника и соответствующую ошибку измерений.

В ходе регулярных наблюдений мерцающих источников, имеющих достаточное для определения их угловых размеров отношение сигнал/шум, можно определить угловые размеры источников, как это описано выше. После фиксации углового размера источника имеем два свободных параметра: эффективную скорость неоднородностей солнечного ветра и спектральный индекс турбулентности.

На втором шаге при моделировании спектра мощности предполагается, что угловой размер источника известен, определяем скорость солнечного ветра и спектральный индекс турбулентности  $n$ . Экспериментальный спектр мощности подгоняется модельными спектрами (при зафиксированном угловом размере источника) методом наименьших квадратов. Фактически ищется длина плоского участка спектра (т.е. скорость солнечного ветра) и определяется его наклон (угол наклона связан с показателем турбулентности). На Рисунках 14 и 15 представлены примеры теоретических спектров мерцаний для разных значений скорости неоднородностей солнечного ветра и спектрального индекса турбулентности,



**Рисунок 14.** Теоретические спектры мерцаний для разных значений скорости неоднородностей солнечного ветра. Скорость солнечного ветра указана в км/с ( $n = 3.6$ ,  $\theta_0 = 0.1''$ ). Неопубликованный иллюстративный материал, совместный результат диссертанта.



**Рисунок 15.** Теоретические спектры мерцаний для разных значений спектрального индекса турбулентности ( $v = 400$  км/с,  $\theta_0 = 0.1''$ ). Неопубликованный иллюстративный материал, совместный результат диссертанта.

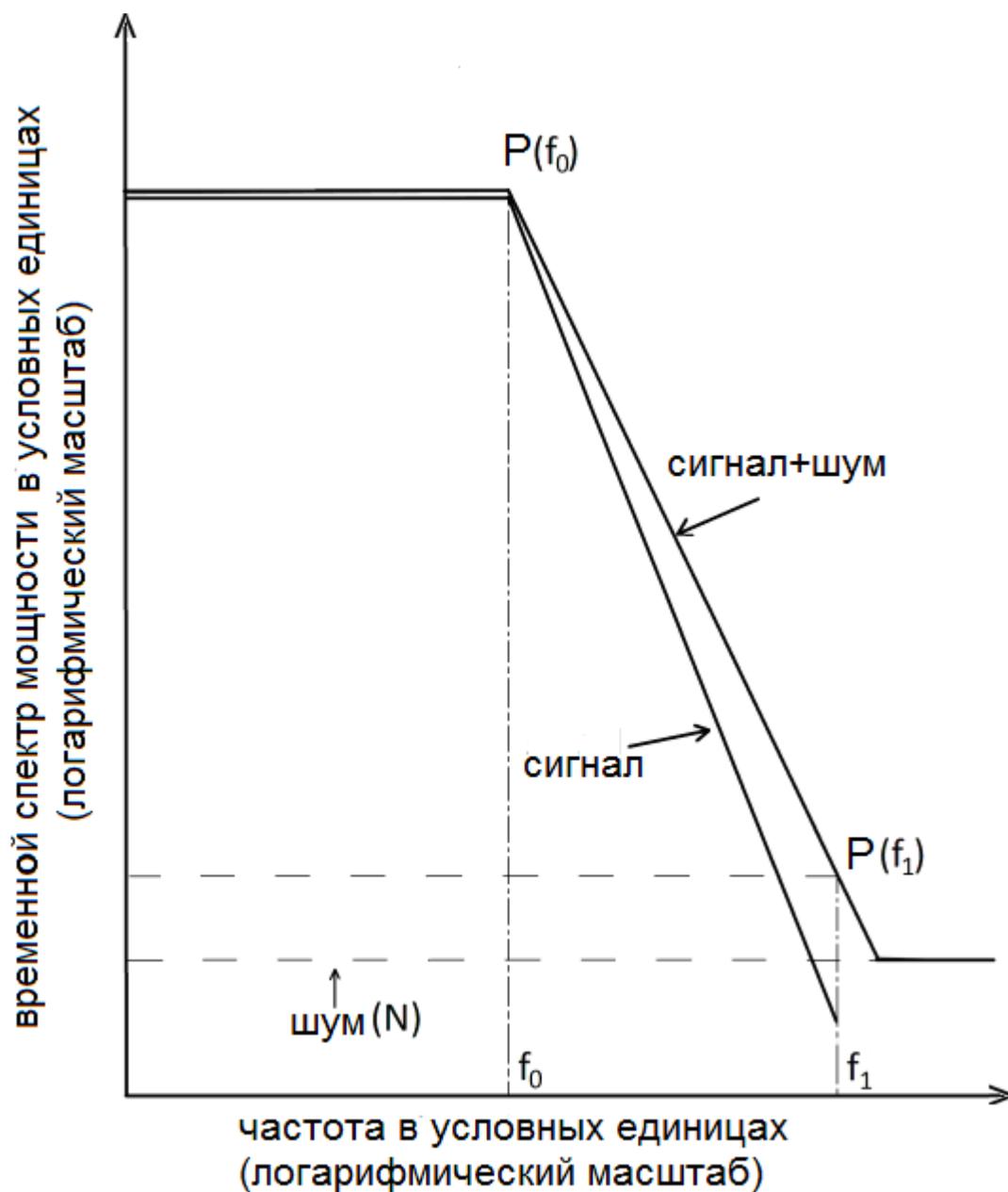
соответственно. Таким образом, из экспериментальных спектров мощности в итоге определяются все три свободных параметра.

### **§ 2.5. Влияние шума на оценку спектрального индекса турбулентности $n$ и углового размера источников**

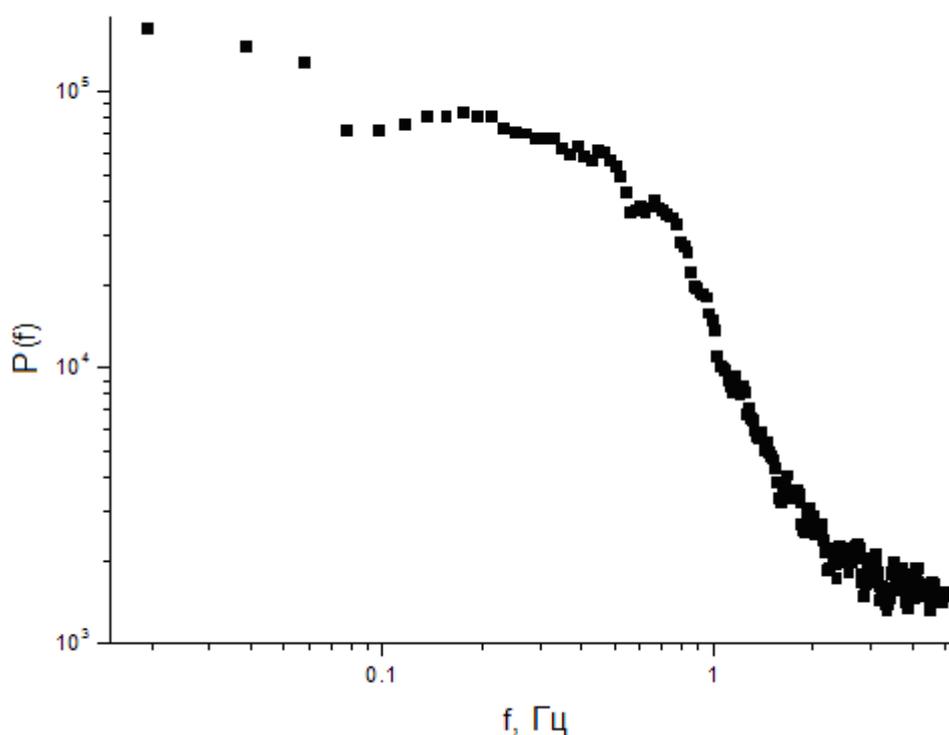
Идеальный спектр мощности IPS, представленный на Рисунке 16, имеет типичную форму с приблизительно постоянным уровнем на низких частотах и уменьшается по степенному закону на высоких частотах (трехмерный спектральный индекс турбулентности  $n \approx 3.6$ ).

В реальных наблюдениях входящий сигнал имеет конечную продолжительность, и спектр мощности искажен шумом. Шумы проявляются в спектрах мощности в виде плоской части на высоких частотах. Влияние шума на форму спектра мощности показано на Рисунке 16. На самых высоких частотах спектр мощности становится плоским. Таким образом, угловой размер источника и спектральный индекс турбулентности могут быть искажены шумом. Качественно понятно, что чем слабее источник (низкое SNR), тем больше вклад шума. Однако количественные оценки вклада шума в изменение оценки углового размера источника и спектрального индекса турбулентности не известны. На Рисунке 17 показан реальный спектр мощности источника 3С 298 для сравнения со схематическим изображением.

На Рисунке 16:  $f_0$  - частота излома спектра мощности,  $N$  - средний уровень шумов,  $f_1$  - последняя точка, в которой спектр мощности выше уровня шума (до этого момента мы сравним экспериментальный спектр с набором теоретических спектров мощности).



**Рис. 16.** Схематическое изображение спектра мощности при отсутствии шума (идеальный случай) и в случае, когда шумы присутствуют. Совместный результат диссертанта из работы [155].



**Рис. 17.** Пример спектра мощности источника ЗС 298. Совместный результат диссертанта из работы [155].

При отсутствии шума (идеальный случай) спектр IPS степенной,  $P_0(f) = Af^{-\alpha}$  (например, см. обзор [110]). Спектральный индекс  $\alpha$  временного спектра мощности IPS связан со спектральным индексом турбулентности  $n$  простым соотношением  $n = \alpha + 1$ . При наличии шумов спектр мощности становится более плоским,  $P_s(f) = Af^{-\alpha} + N = Bf^{-\beta}$ , где  $\beta < \alpha$ .

В случае отсутствия шумов имеем:

$$P_0(f_0) = Af_0^{-\alpha} \quad (8)$$

$$P_0(f_1) = Af_1^{-\alpha}$$

Легко получить из (8) временной спектральный индекс IPS:

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\lg\left(\frac{P_0(f_0)}{P_0(f_1)}\right)}{\lg\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \quad (9)$$

Если учитывать шумы, то спектральный индекс смещается в сторону низких значений:

$$P_{s1}(f_1) = Af_1^{-\alpha} + N = f_1^{-\beta} \quad (10)$$

$$P_{s0}(f_0) = Af_0^{-\alpha} + N = f_0^{-\beta}$$

$\beta$  – временной спектральный индекс IPS при наличии шумов. С учетом соотношений (8) - (10) можно найти

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\lg\left(\frac{P_{s0}}{P_{s1}}\right)}{\lg\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} = \frac{\lg\left(\frac{Af_0^{-\alpha} + N}{Af_1^{-\alpha} + N}\right)}{\lg\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} = \alpha - \frac{\lg\left(1 + \frac{Nf_1^\alpha}{A}\right)}{\lg\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} = \{P(f_1) = Af_1^{-\alpha}\} = \\ &= \alpha - \frac{\lg\left(1 + \frac{N}{P(f_1)}\right)}{\lg\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} = \alpha - \Delta\alpha \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta\alpha = \frac{\lg\left(1 + \frac{N}{P(f_1)}\right)}{\lg\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \quad (12)$$

Уравнение (12) описывает зависимость сдвига показателя степени  $\Delta\alpha$  от отношения сигнал/шум и может быть использовано для систематической коррекции показателя степени, если измерить это соотношение.

## **Выводы**

1. Разработана методика оценки параметров турбулентности межпланетной плазмы: спектрального индекса турбулентности и скорости движения неоднородностей межпланетной плазмы.
2. Описанная методика позволит значительно расширить информативность наблюдений межпланетной плазмы, которые проводятся на радиотелескопе БСА ФИАН в режиме мониторинга.

### **Глава 3. Индексы межпланетных мерцаний и скорость неоднородностей солнечного ветра**

В Главе 3 частично изложены совместные результаты работ [130, 155, 170-172] диссертанта.

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**

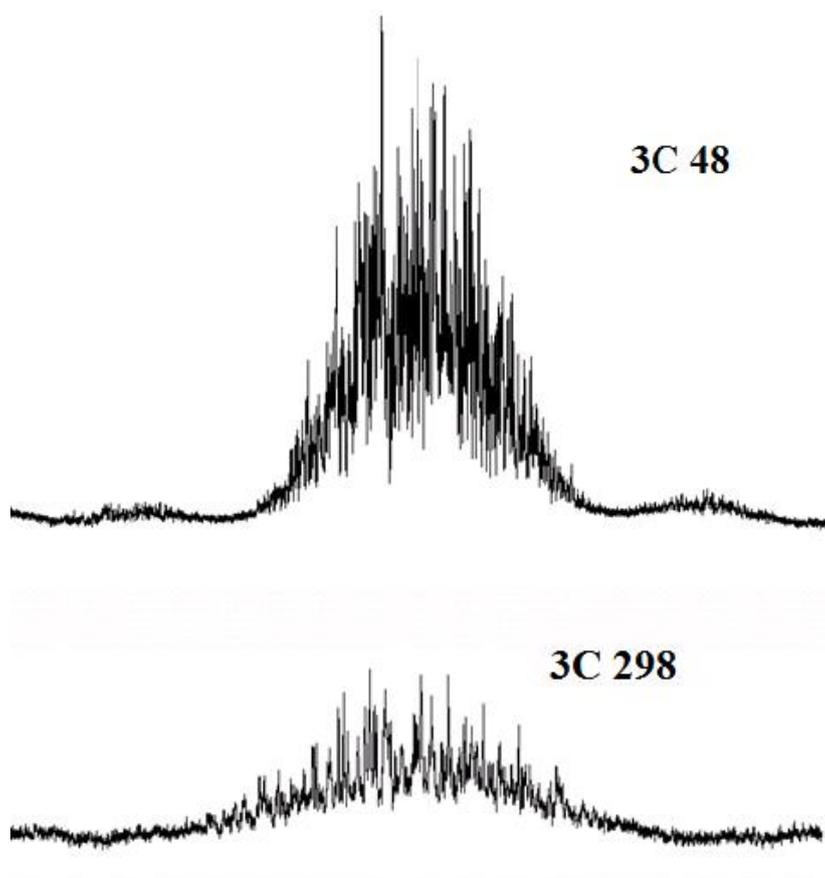
**3С 48 и 3С 298 на фазе спада вблизи минимума**

**23-го цикла солнечной активности**

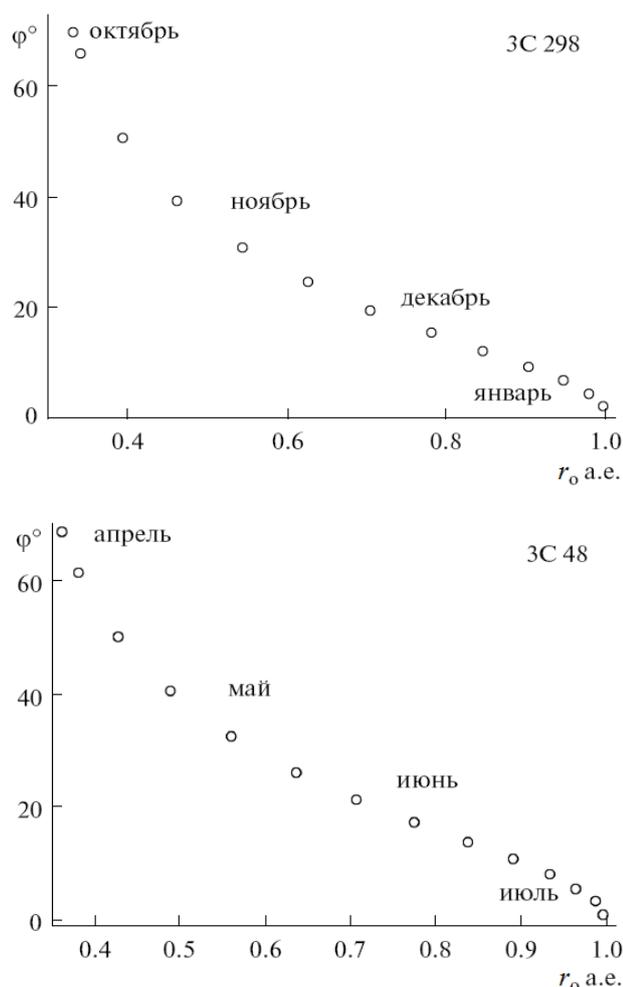
В настоящем разделе представлены результаты наблюдений межпланетных мерцаний, полученные для указанных выделенных источников, в период с

октября 2006 г. по март 2007 г. (источник ЗС 298) и с марта по октябрь 2007 г. (источник ЗС 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.

Наблюдения IPS проходили на антенне БСА ФИАН в режиме мониторинга. Радиоисточники ЗС 48 (прямое восхождение  $1^{\text{h}}35^{\text{m}}$ , склонение  $32^{\circ} 53'$ ) и ЗС 298 (прямое восхождение  $14^{\text{h}}17^{\text{m}}$ , склонение  $6^{\circ} 41'$ ) являются сильнейшими мерцающими источниками в нижней и верхней диаграммах, соответственно. Эти источники являются самыми сильными в наших наблюдениях. Примеры исходных записей источников ЗС 48 и ЗС 298 представлены на Рисунке 18, где видно, что источник ЗС 48 гораздо сильнее, чем источник ЗС 298. Прохождение источников в периоды наблюдений в координатах гелиоцентрическое расстояние прицельной точки луча зрения – гелиоширота  $\phi$  представлено Рисунке 19.

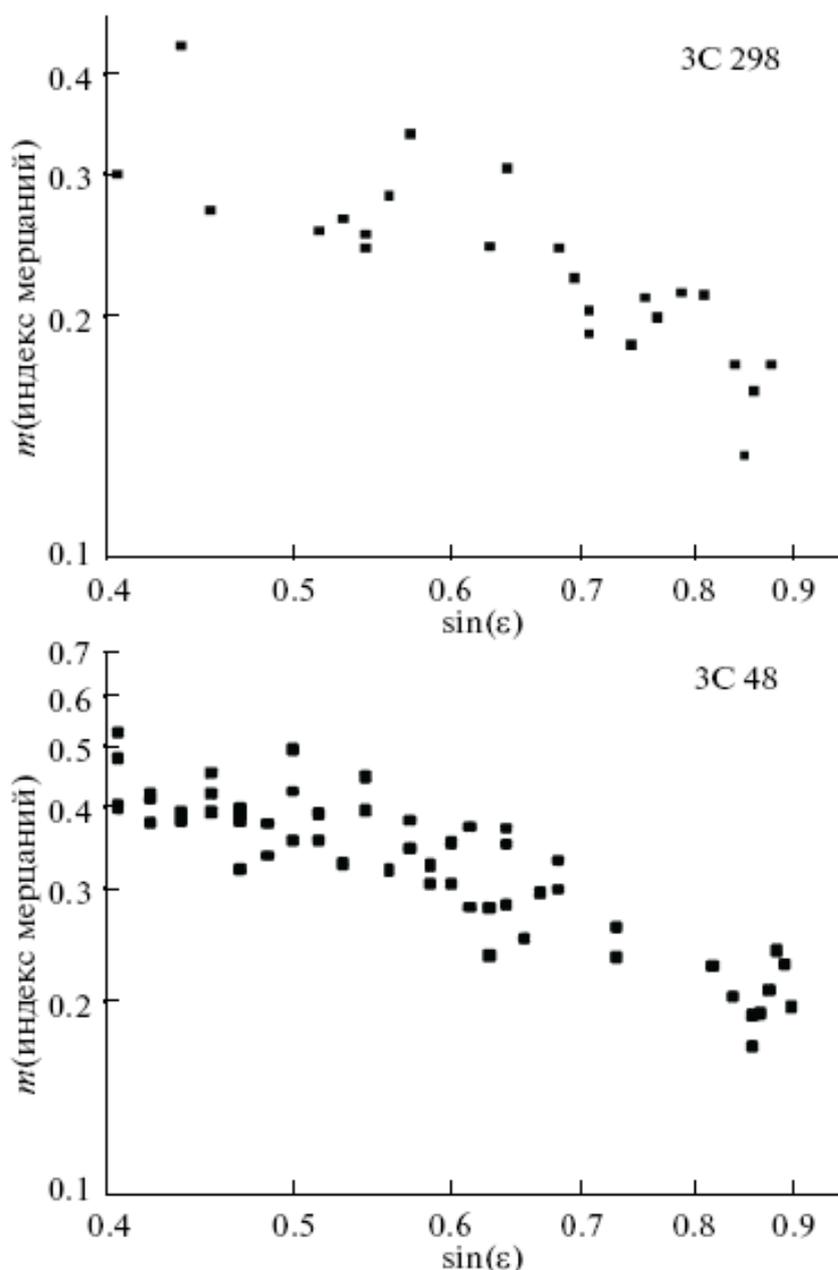


**Рисунок 18.** Примеры типичных записей источников ЗС 48 и ЗС 298. Совместный результат диссертанта из работы [155].



**Рисунок 19.** Зависимость гелиошироты прицельной точки луча зрения от гелиоцентрического расстояния (в а.е.) при прохождении источников 3C 298 (а) и 3C 48 (б). Совместный результат диссертанта из работы [130].

На Рисунке 20 в двойном логарифмическом масштабе приведены зависимости индексов мерцаний источников 3C 298 и 3C 48 в зависимости от элонгации  $\varepsilon$  ( $r_0 = 1AU \cdot \sin \varepsilon$  – 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 20 помещены в область  $\varepsilon = 90^\circ$ . Вписывание степенной функции  $m \sim (\sin \varepsilon)^p$  в радиальные



**Рисунок 20.** 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 [130].

зависимости индекса мерцаний (Рисунок 20) дает результат  $p \approx -1$  для обоих источников.

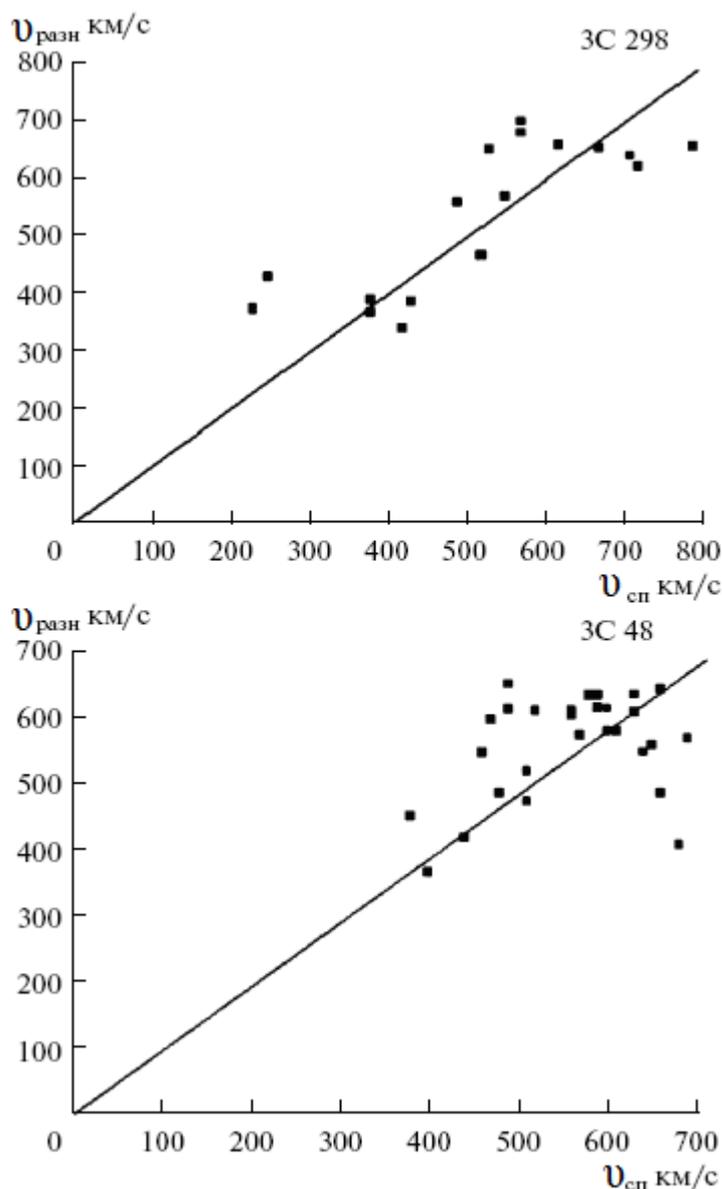
В сферически симметричном случае  $m \sim r^{-\frac{3}{2}}$ . Учет возможной растущей радиальной зависимости внешнего масштаба турбулентности  $L_0(r)$  [173] приведет

к зависимости  $m(r_0)$ , еще более сильной, чем  $m \sim r^{-\frac{3}{2}}$ . Реально измеряемые зависимости  $m(r_0)$ , Рисунок 20, 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 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. Если при интегрировании вдоль луча зрения практически независимый от элонгации вклад примыкающих к орбите Земли низкоширотных областей соизмерим с зависящим от элонгации вкладом примыкающих к прицельной точке среднеширотных областей, то радиальная зависимость индекса мерцаний будет заметно слабее, чем в сферически симметричном случае. Далее мы оценим область приэкваториальных широт, занимаемую медленным ветром.

Поскольку в области сформировавшегося течения возможные фазовые скорости МГД волн по крайней мере на порядок меньше скорости солнечного ветра, то можно принять, что скорость неоднородностей совпадает со скоростью солнечного ветра. Для проверки методики определения скорости солнечного ветра сравним полученные нами результаты с результатами, полученными в университете Нагоя.

Если проводить одновременные наблюдения на трех и более радиотелескопах, разнесенных на расстояния порядка масштаба неоднородностей дифракционной картины, то можно измерить величину и направление скорости движения дифракционной картины на Земле и определить скорость солнечного ветра. В университете Нагоя наблюдения ведутся на 4 радиотелескопах на частоте 327 МГц. Результаты наблюдений представлены на сайте [131].

По измеренным в периоды наблюдений спектрам мерцаний были определены частоты излома  $f_0$  и скорости  $v_{сп}$  (формула (6)). Найденные величины  $v_{сп}$  приведены на горизонтальной оси Рисунка 21 для источников 3С 298 и 3С 48



**Рисунок 21.** Оценки скорости солнечного ветра, полученные в университете Нагойя методом разнесенного приема (вертикальная ось), и по характерной ширине спектров мерцаний (горизонтальная ось) для источников 3C 298 (а) и 3C 48 (б). Совместный результат диссертанта из работы [130].

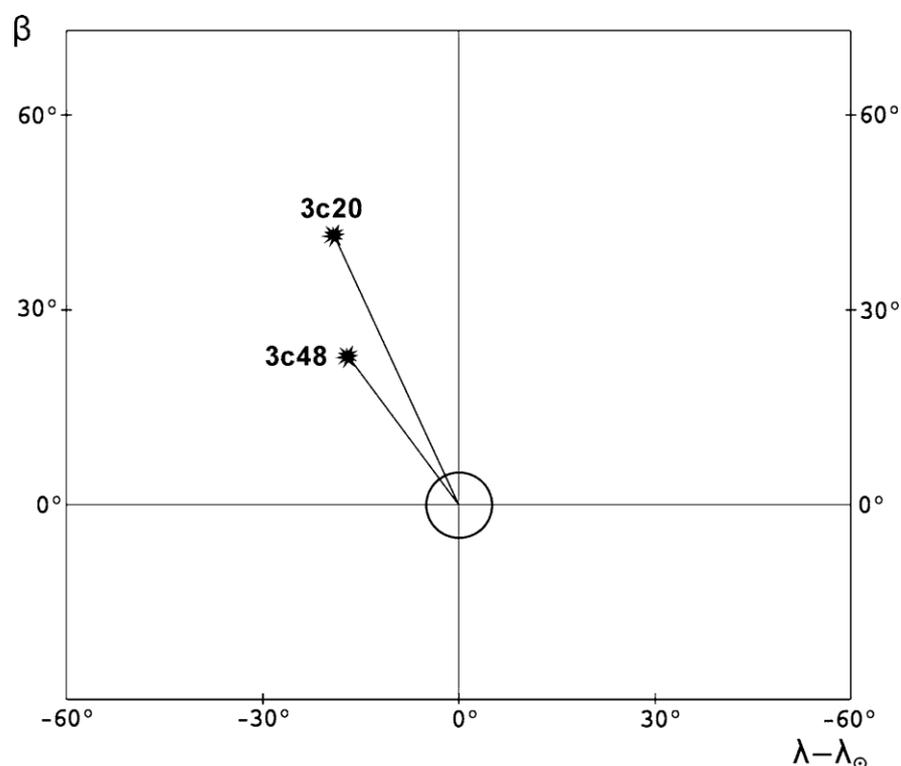
соответственно. Видно, что значения  $u_{\text{ср}}$  как правило заключены в интервале 400 км/с–700 км/с, причем значения 400 км/с–500 км/с относятся к низким гелиоширотам и большим элонгациям, а значения 600 км/с–700 км/с – к высоким гелиоширотам и более близким к Солнцу областям. В целом данные по скоростям согласуются с характерной для периода минимума солнечной активности бимодальной структурой солнечного ветра [174]: медленный ветер на низких

гелиоширотах и быстрый на высоких широтах. На вертикальных осях Рисунка 21 приведены значения скорости солнечного ветра  $v_{\text{разн}}$ , измеренные в университете Нагойя методом разнесенного приема мерцаний для тех же источников и в те же дни [131]. Вписывание линейной зависимости  $v_{\text{разн}} = k v_{\text{сп}}$  в данные по  $v_{\text{сп}}$  и  $v_{\text{разн}}$  (Рисунок 21)  $k = 1.007 \pm 0.003$  для источника 3С 48 и  $k = 1.012 \pm 0.005$  для источника 3С 298. Найденные величины  $k$  показывают, что скорости, определенные методами разнесенного приема и по ширине спектра мерцаний в среднем весьма близки друг к другу. Этот вывод обосновывает возможность систематических одно пунктовых наблюдений мерцаний для определения скорости солнечного ветра. Отметим также, что совпадение  $v_{\text{сп}}$  и  $v_{\text{разн}}$  косвенным образом подтверждает сделанное предположение, что измеряемая по мерцаниям скорость солнечного ветра для данного источника может быть отнесена к области, примыкающей к прицельной точке луча зрения.

Заметное отличие  $v_{\text{сп}}$  и  $v_{\text{разн}}$  при больших скоростях солнечного ветра (порядка и больше 600 км/с) возможно связано со следующими причинами. Во-первых, для оценки скоростей солнечного ветра используются различные методики. Во-вторых, возможно влияние географических факторов: наблюдения  $v_{\text{сп}}$  и  $v_{\text{разн}}$  проведены с разницей около 5 часов, за это время состояние МПП могло измениться.

### § 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<sup>h</sup> 13<sup>m</sup> UT. С выбросом была связана вспышка класса М 8.0 [29]. В то время на антенне БСА ФИАН на частоте 111 МГц проводились наблюдения мерцаний отдельных источников. Наиболее интересные результаты, связанные с распространением выброса, получены по источникам ЗС 48 и ЗС 20. Эклиптические координаты источников  $\lambda_{ЗС48} = 36^\circ$ ,  $\beta_{ЗС48} = 23^\circ$ ,  $\lambda_{ЗС20} = 34^\circ$ ,  $\beta_{ЗС20} = 43^\circ$ . Долгота Солнца 14 мая была  $\lambda_\odot = 53^\circ$ , соответственно  $\lambda_{20} - \lambda_\odot = 17^\circ$ ,  $\lambda_{48} - \lambda_\odot = 19^\circ$ . Положение источников относительно Солнца показано на Рисунке 22.

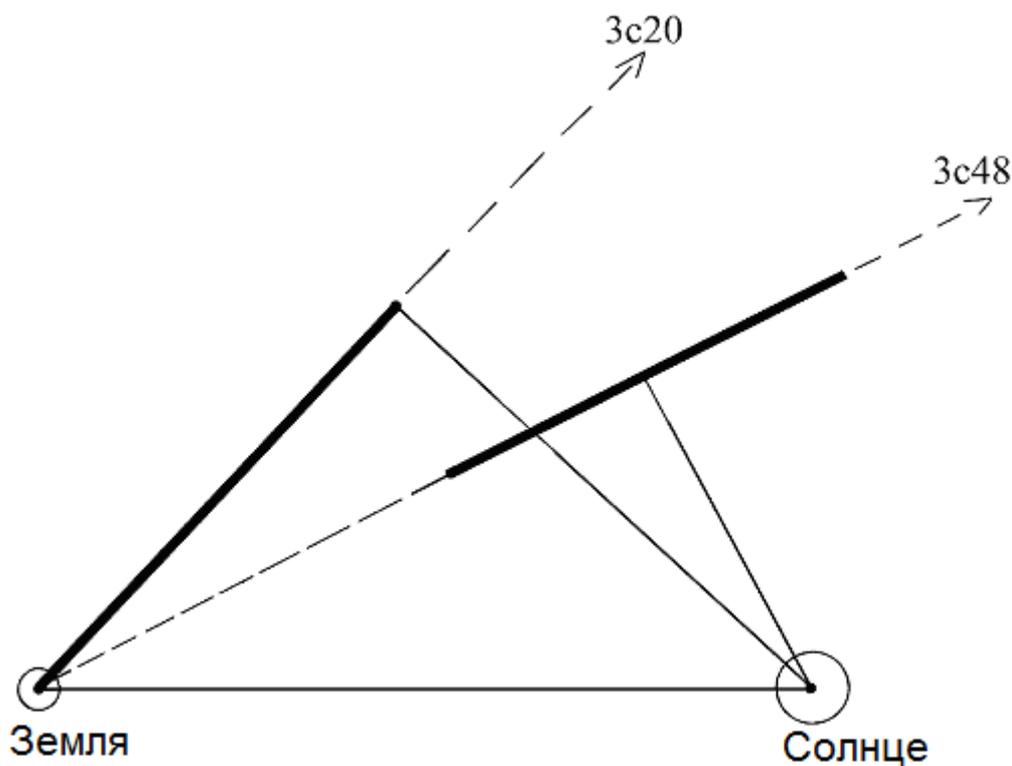


**Рисунок 22.** Положение радиоисточников ЗС 20 и ЗС 48 в эклиптических координатах во время наблюдений в мае 2005. Совместный результат диссертанта из работы [171].

На Рисунке 22 видно, что источники находятся близко друг от друга. Однако, существенное различие угловых размеров источников ЗС 48 и ЗС 20 приводит к тому, что эффективные мерцания происходят на разных областях турбулентной плазмы. Радиоисточник ЗС 48 имеет угловые размеры около  $0''.1$ , поэтому может рассматриваться как точечный. Область интенсивной модуляции радиоволн на луче зрения для спокойного состояния плазмы находится в интервале

$$0.6 \text{ а. е.} = 1 \text{ а. е.} (\cos \varepsilon_{3c48} - 0.6 \sin \varepsilon_{3c48}) < z < 1 \text{ а. е.} (\cos \varepsilon_{3c48} + 0.6 \sin \varepsilon_{3c48}) = 1.2 \text{ а. е.},$$

где  $z$  – расстояние от наблюдателя до модулирующих излучение неоднородностей. 14 мая элонгация источника ЗС 48 составляла приблизительно  $25^\circ$ . При этом прицельная точка луча зрения на источник находилась на гелиоцентрическом расстоянии около 0.4 а. е. Радиоисточник ЗС 20 протяженный, его угловые размеры – несколько угловых секунд. Из-за значительных угловых размеров источника наибольший вклад в мерцания вносят области турбулентной



**Рисунок 23.** Геометрия лучей зрения во время наблюдений источников ЗС 20 и ЗС 48. Области эффективной модуляции отмечены сплошными толстыми линиями для каждого источника. Совместный результат диссертанта из работы [171].

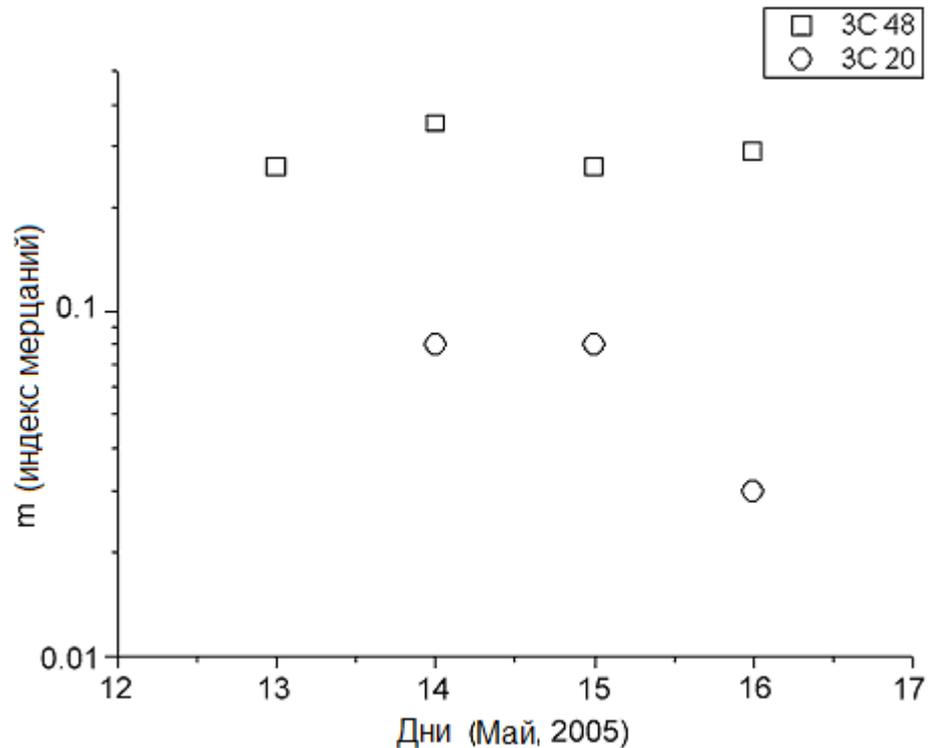
плазмы, близкие к наблюдателю. Область эффективного влияния турбулентной плазмы для спокойного состояния

$$0 < z < 1 \text{ а. е. } \cos \varepsilon_{3c20} \approx 0.7 \text{ а. е.},$$

где  $\varepsilon_{3c20} \approx 45^\circ$  – элонгация источника 14 мая, когда прицельная точка луча зрения на источник находилась на гелиоцентрическом расстоянии около 0.7 а. е. На Рисунке 23 показана геометрия наблюдений в гелиоцентрических координатах.

На Рисунке 24 показано изменение индексов мерцаний во время наблюдений.

Видно, что 14 мая у источника 3С 48 наблюдалось возрастание индекса межпланетных мерцаний примерно на 20-30% от среднего значения за время наблюдений на данных элонгациях. Соответствующий временной спектр мерцаний представлен на Рисунке 25. Заметного изменения ширины спектра не наблюдается, а это означает, что нет заметных изменений в скорости картины мерцаний. Источник 3С 48 наблюдался  $12^{\text{h}} 20^{\text{m}}$  UT 14 мая на небольших угловых



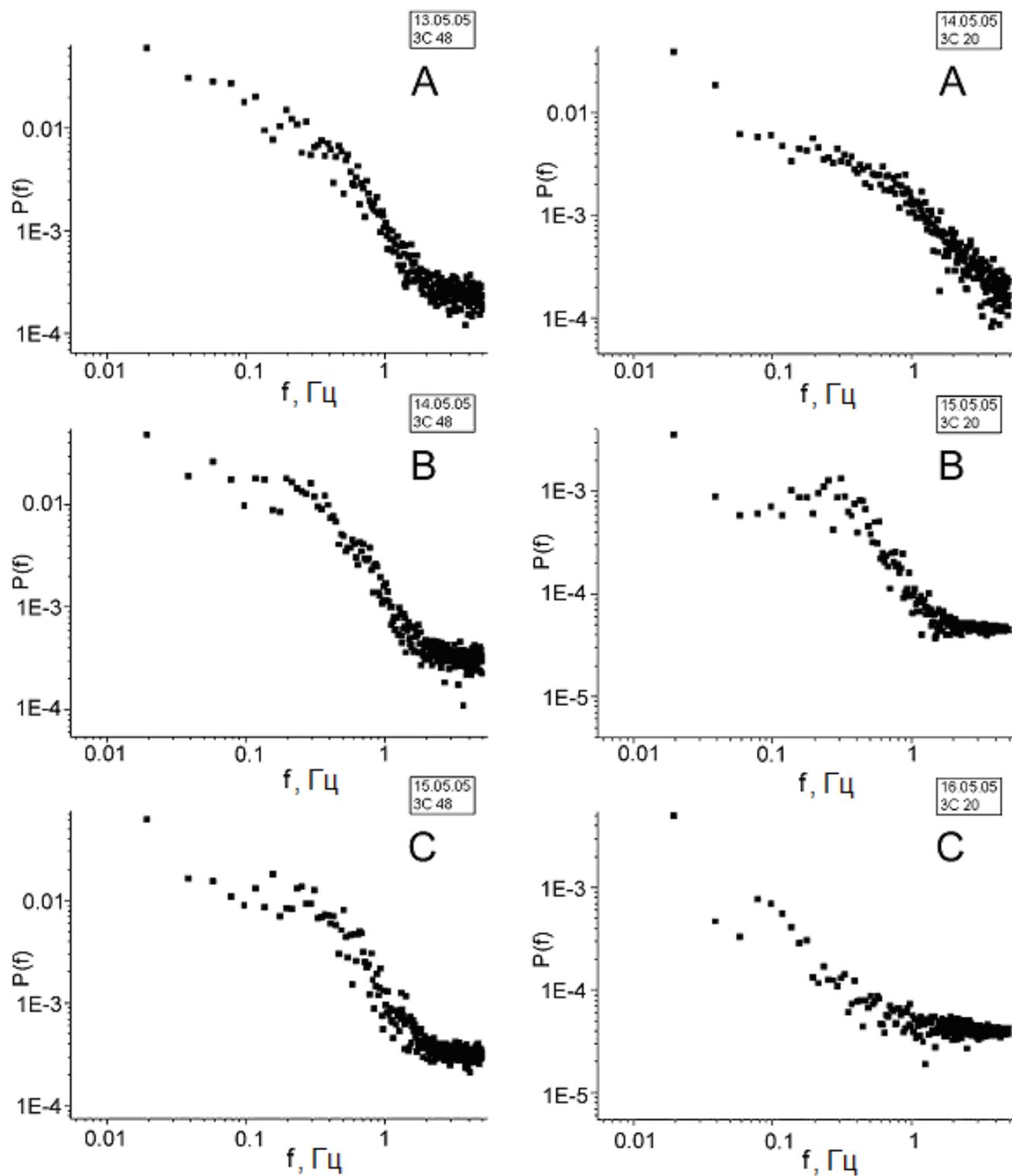
**Рисунок 24.** Индекс мерцаний источников 3С 20 и 3С 48. Совместный результат диссертанта из работы [171].

расстояниях от Солнца. Увеличение индекса мерцаний для этого источника показывает, что возмущения возникают в узком слое на луче зрения. Отсутствие заметного увеличения в скорости картины мерцаний может быть объяснено эффектом проекции: межпланетные мерцания регистрируют только поперечную к лучу зрения компоненту скорости солнечного ветра. Используя время задержки между событием в короне и наблюдением изменений для 3С 48, можно оценить минимальное значение средней скорости выброса корональных масс,  $v_{\text{Sun-3c48}} > 800 \text{ км/с}$ .

В условиях спокойного солнечного ветра источник 3С 20 мерцает слабо, среднее значение индекса межпланетных мерцаний около 0.03. Из Рисунка 24 видно, что 14 и 15 мая произошло усиление мерцаний примерно в три раза, вызванное прохождением коронального выброса массы. Источник 3С 20 зондировал эффективную область, располагавшуюся на гелиодолготах от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  к востоку от центрального меридиана. Индекс межпланетных мерцаний 16 мая соответствует спокойным мерцаниям.

Небольшое увеличение индекса мерцаний для 3С 48 и значительное увеличение индекса мерцаний для 3С 20 позволяет заключить, что возмущение, вызванное корональным выбросом массы, в восточной части северного полушария было сильным внутри угла около  $50^\circ$ .

Временной спектр мощности мерцаний 3С 20 представлен на Рисунке 25 справа. Спектр мерцаний 16 мая типичен для протяженного источника с угловыми размерами около 3-5" в условиях спокойной межпланетной плазмы [135]. Временной спектр мерцаний 14 мая качественно похож на спектр 16 мая, но имеет примерно в 10 раз большую интегральную энергию и смещен в сторону высоких частот. Смещение частоты соответствует увеличению в 3 раза локальной скорости плазмы. Спектр мощности флуктуаций, измеренный 15 мая (Рисунок 25В), похож на спектр точечного источника и сильно отличается от спектров 14 (Рисунок 25А) и 16 мая (Рисунок 25С), особенно в области высоких частот. Такой спектр протяженного источника, увеличение индекса мерцаний и уменьшение



**Рисунок 25.** Временные спектры мерцаний радиоисточников 3C 48 и 3C 20. А,В,С – даты наблюдений. Совместный результат диссертанта из работы [171].

характерного времени мерцаний объясняются узким слоем с повышенным уровнем турбулентных флуктуаций, расположенным на расстоянии менее 0.2 а. е. от наблюдателя. Локальная скорость плазмы была примерно такой же, как в спокойном состоянии. Приближение эффективного слоя турбулентной плазмы к наблюдателю ослабило влияние углового размера источника на параметры мерцаний и приблизило их величины к параметрам мерцаний точечного источника. Данные для источника 3С 20, полученные 14 мая 13<sup>h</sup> 20<sup>m</sup> UT, показывают, что фронт коронального выброса массы проходил расстояние не менее 0.7 а. е. за 21 час со средней скоростью  $v_{\text{Sun-3c20}} \geq 1\,300$  км/с. Время задержки около 13.5 часов между 3С 20 14 мая и событием в магнитосфере Земли соответствует средней скорости коронального выброса массы  $v_{\text{3c20-Earth}} \approx 900$  км/с между 0.7 а. е. и 1 а. е. и показывает, что корональный выброс массы замедлялся внутри 1 а. е. при распространении от Солнца.

### Выводы

1. Получены радиальные зависимости индексов мерцаний, которые оказываются более слабыми, чем ожидается для сферически симметричной модели солнечного ветра. Причина отличия обусловлена, по-видимому, влиянием низкоширотного слоя плазмы с повышенным абсолютным уровнем турбулентности.
2. По временным спектрам мерцаний определены скорости движения неоднородностей, которые, как показано, хорошо согласуются с оценками, полученными методом разнесенного приема. 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. В целом полученные результаты находятся в соответствии с типичной для периода минимума солнечной активности устойчивой бимодальной структурой с медленным ветром на низких гелиоширотах и быстрым, менее плотным ветром на средних и высоких гелиоширотах.
4. 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 3С 20.
5. 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 в условиях возмущенного солнечного ветра.

## **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. Полученные результаты опубликованы в совместных работах [153-155, 172, 175] диссертанта.

### **§ 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. В период наблюдений отношение сигнал/шум для 3С 48 превосходило 30, полное число таких записей составило 157. Для источника 3С 298 анализируем только 45 записи с отношением сигнал/шум более 15. По этой причине основные

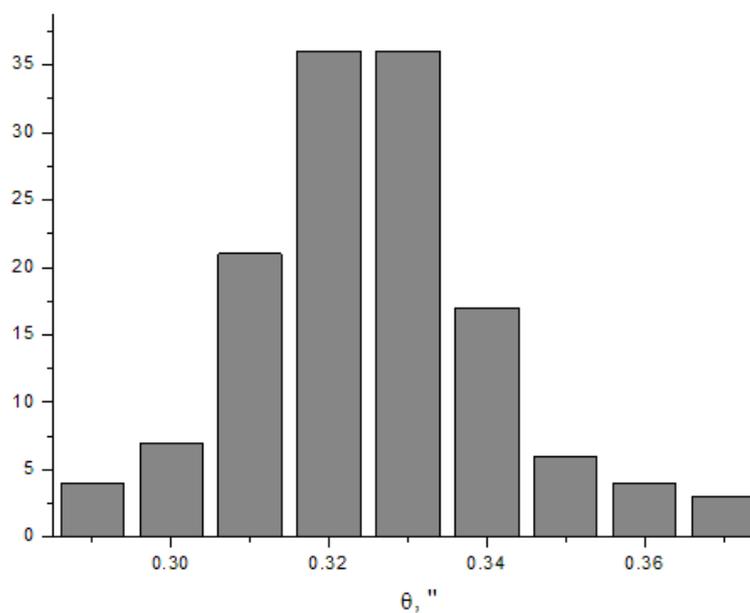
результаты представлены для источника 3С 48. По исходным записям флуктуаций потока излучения источника вычислялись временные спектры мощности IPS. По данным космического аппарата GOES [29] за период наблюдений не обнаружено вспышек классов X или M, т.е. состояние межпланетной плазмы было относительно спокойным.

Проведем анализ наблюдений, используя описанную выше методику.

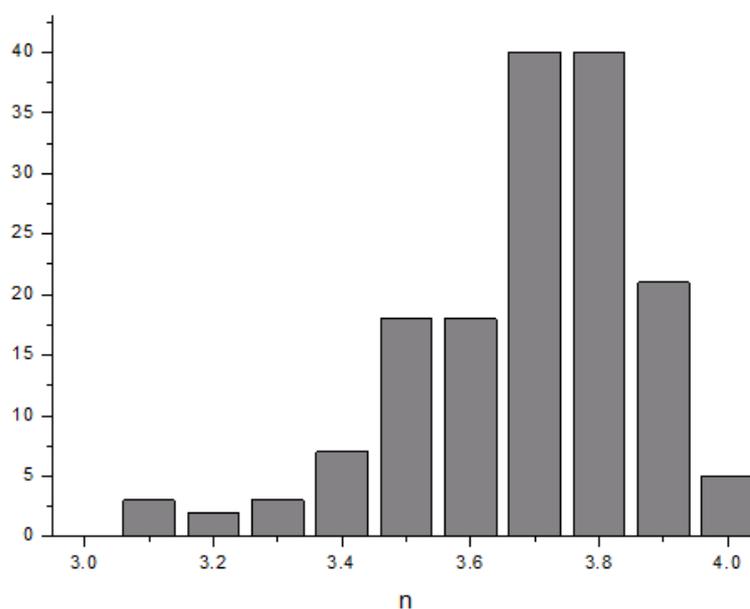
На Рисунке 26 приведена гистограмма, показывающая распределение угловых размеров источника 3С 48. Видно, что распределение достаточно узкое. С помощью этого распределения можно найти  $\langle \theta_0 \rangle = 0.326'' \pm 0.016''$ . Согласно опубликованным данным, полученным методом мерцаний на частоте 81.5 МГц, угловой размер 3С 48 составляет 0.5'' [176], а согласно анализу VLBI- и VLA-наблюдений, приведенном в работе [177], угловой размер 3С48 составляет 0.1'' × 0.4''. В зависимости от ориентации источника на небе по отношению к направлению солнечного ветра его оцениваемый (по мерцаниям) угловой размер может быть как 0.1'', так и 0.4''. На наблюдаемых элонгациях он приблизительно равен 0.3'' [177]. Распределение найденных значений спектрального индекса турбулентности  $n$  представлено на Рисунке 27. Эти значения лежат в интервале от 3.1 до 4.0 при среднем значении  $n = 3.7 \pm 0.2$ .

Проведем анализ полученных результатов по спектральному индексу турбулентности  $n$ , с тем, чтобы попытаться выбрать модель турбулентности, описывающую МПП. На Рисунке 28 построена зависимость между спектральным индексом турбулентности плазмы и наблюдаемой скоростью солнечного ветра.

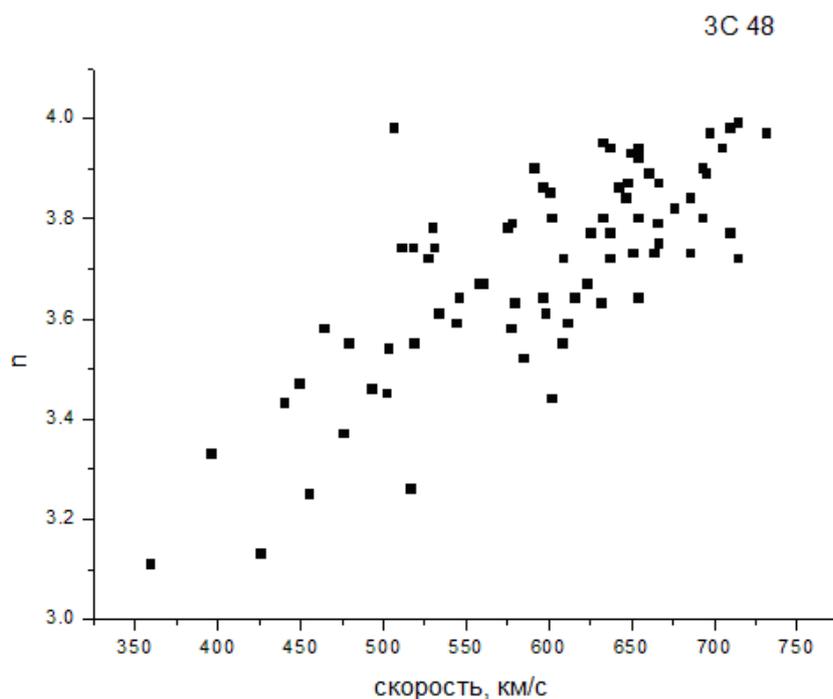
Из данных Рисунке 28 следует, что медленному солнечному ветру соответствует плазма с меньшим значением спектрального индекса турбулентности, а быстрому – с большим. Прицельная точка – ближайшая к Солнцу точка на луче зрения, поэтому концентрация плазмы в этой точке максимальна на луче зрения. Таким образом, основной вклад в мерцания дают области в окрестности прицельной точки. С увеличением элонгации прицельная точка сдвигается ближе к наблюдателю, т.е. в область низких гелиоширот. Следовательно, зависимость оцениваемых из спектра мощности параметров от



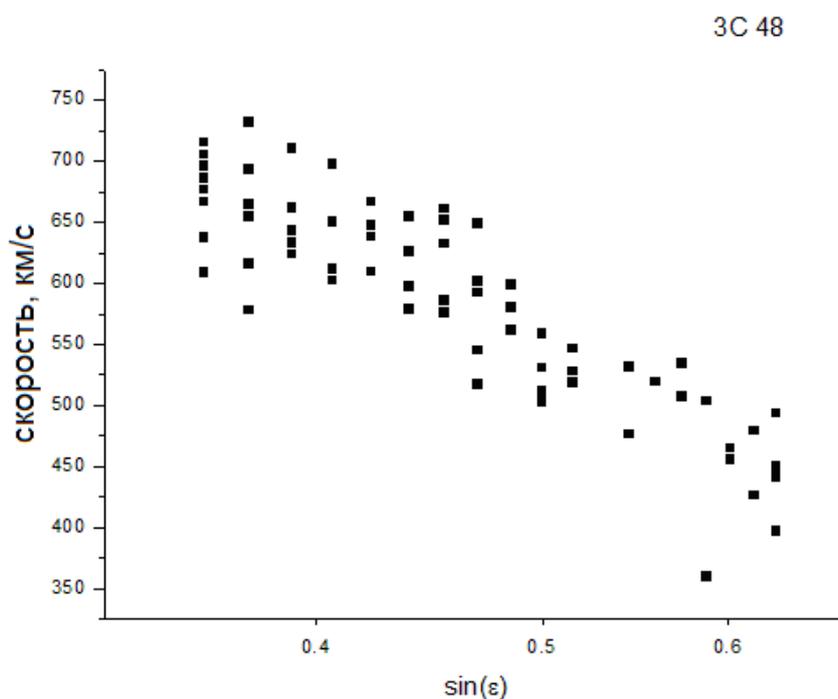
**Рисунок 26.** Гистограмма распределения угловых размеров источника 3C 48. На горизонтальной оси оценка углового размера источника из спектра (в долях угловой секунды), а на вертикальной оси количество оценок. Совместный результат диссертанта из работы [153].



**Рисунок 27.** Гистограмма распределения значений спектрального индекса турбулентности плазмы по данным наблюдений источника 3C 48. Совместный результат диссертанта из работы [153].



**Рисунок 28.** Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от скорости солнечного ветра по наблюдениям источника 3C 48. Совместный результат диссертанта из работы [154].



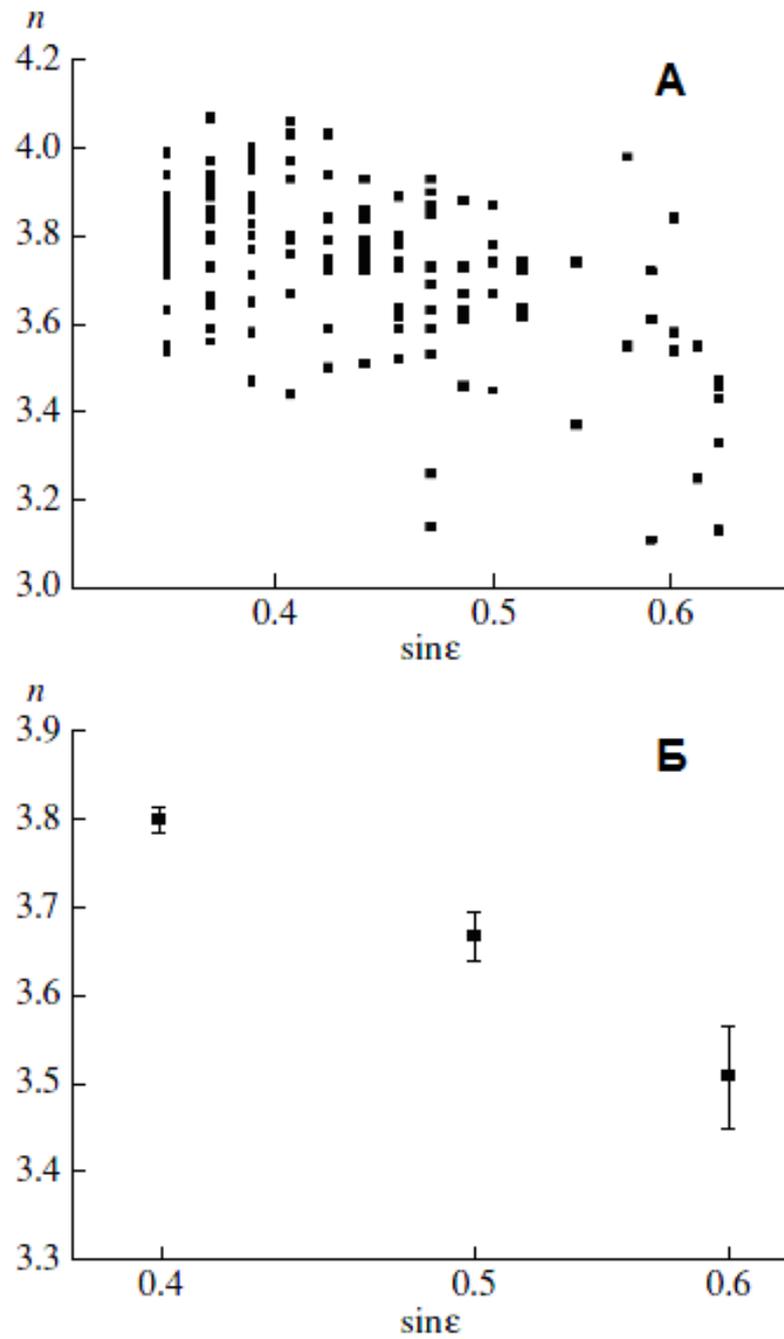
**Рисунок 29.** Зависимость скорости солнечного ветра от элонгации по данным наблюдений источника 3C 48. По оси абсцисс логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [154].

элонгации несет в себе информацию о зависимости и от гелиошироты. Зависимость скорости солнечного ветра от элонгации представлена на Рисунке 29. Из этого Рисунка видно, что при увеличении элонгации и, соответственно, уменьшении гелиошироты скорость солнечного ветра заметно падает. Полученный результат можно объяснить типичной для периода минимума солнечной активности устойчивой бимодальной структурой солнечного ветра. На низких гелиоширотах находится медленный ветер, а быстрый, менее плотный ветер расположен на средних и высоких гелиоширотах.

Для анализа гистограмму, представленную на Рисунке 27 и показывающую распределение спектрального индекса турбулентности, мы приводим на Рисунке 30 в виде зависимости спектрального индекса турбулентности от элонгации. На Рисунке 30 видно уменьшение спектрального индекса турбулентности при увеличении элонгации.

Изменение наблюдаемого спектрального индекса турбулентности  $n$  с элонгацией может быть вызвано как реальной зависимостью  $n(\epsilon)$  (вариант 1), так и отличием распределения уровня турбулентности от сферически-симметричного (вариант 2).

Рассмотрим вариант 2. Действительно, согласно измерениям КА Ulysses и результатам других авторов [15-19] (подробнее см. § 1.1.) в минимуме солнечной активности для солнечного ветра характерна бимодальная структура с низкой скоростью и высокой плотностью на низких ( $<20^\circ$ ) гелиоширотах и высокой скоростью и низкой плотностью на средних и высоких ( $>30^\circ$ ) гелиоширотах [174]. Как следует из многочисленных данных, именно такая широтная структура имела место и во время наблюдений 2007–2009 гг. на подходе к минимуму 23/24-го цикла солнечной активности. Поскольку характеристики мерцаний носят интегральный характер, при наблюдениях на сравнительно небольших элонгациях вблизи минимума солнечной активности на луче зрения одновременно присутствуют как быстрые (средние и высокие широты), так и медленные (низкие широты) потоки плазмы. Ниже будет учтено влияние бимодальности солнечного ветра (Рисунок 31), т. е. отклонение от сферической симметрии среды, на



**Рисунок 30.** Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от элонгации для источника 3C 48. По оси абсцисс логарифмический масштаб. А - исходные результаты; Б – усредненные результаты. Совместный результат диссертанта из работы [154].

определяемый по временным спектрам мерцаний спектральный индекс турбулентности  $n$ .

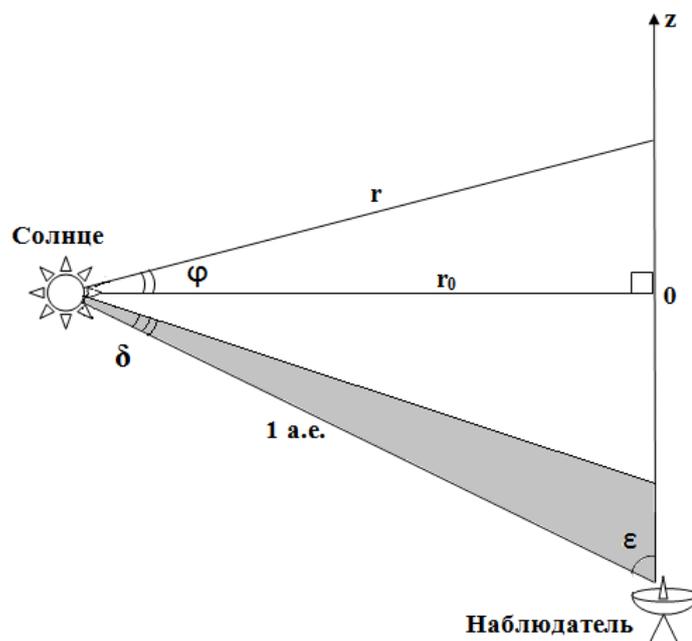
Все обозначения на Рисунке 31 совпадают с обозначениями на Рисунке 11. Угол  $\delta$  характеризует толщину модулирующей среды, занимаемую медленным солнечным ветром. Для определения параметра  $\delta$  используем измеренную зависимость индекса мерцаний  $m$  от элонгации

$$m^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \int P(f) df, \quad (13)$$

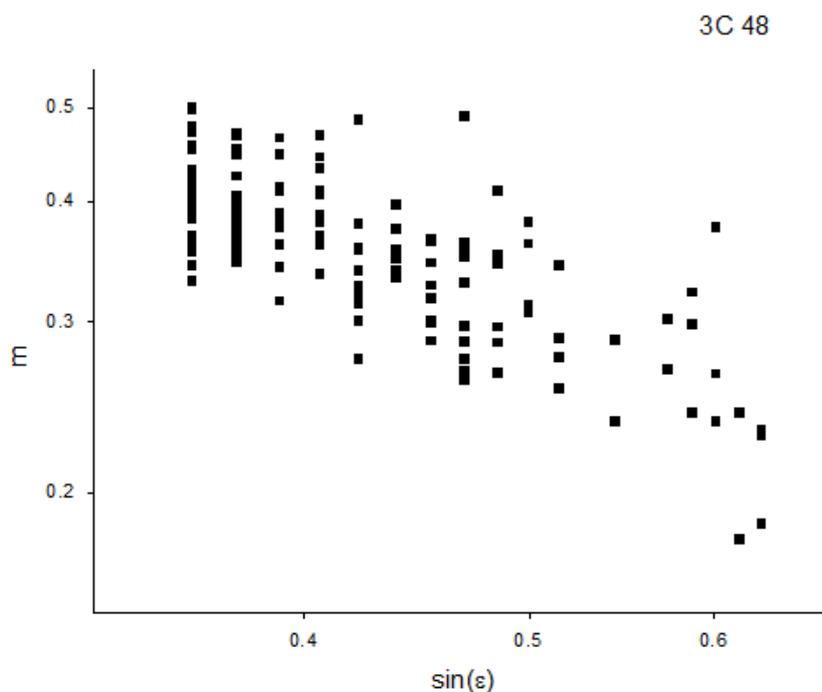
где  $P(f)$  – временной спектр мерцаний. Отметим, что индекс мерцаний (13) не зависит от скорости движения неоднородностей, но зависит от пространственного распределения уровня турбулентности, спектрального индекса  $n$  и углового размера источника.

На Рисунке 32 показана зависимость величины индекса мерцаний  $m$  от элонгации в период наблюдений. С удалением от Солнца индекс мерцаний уменьшается примерно по степенному закону, причем эта зависимость оказывается более медленной, чем ожидаемая в случае сферической симметрии среды.

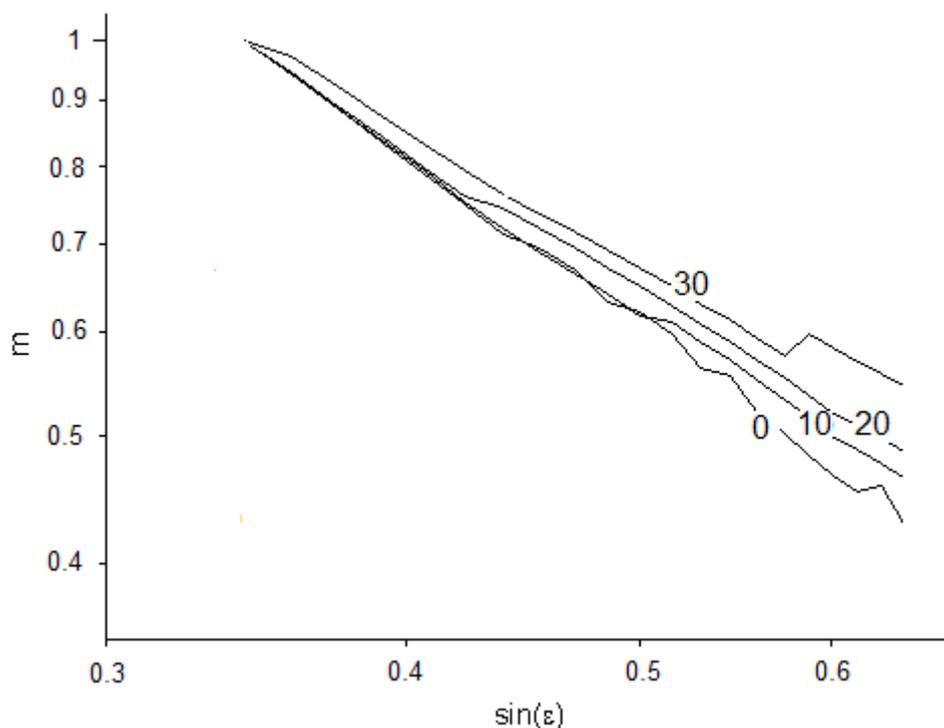
При моделировании параметров мерцаний с учетом бимодальной структуры в отличие от (3), где параметр  $A_0$  считался постоянным, принималось, что в слое медленного солнечного ветра (затемненная область на Рисунке 31) абсолютный уровень турбулентности в 4 раза выше, чем в быстром (незатемненная область),  $A_{\text{медл}} = A_2 = 4A_{\text{быстр}}$ ,  $A_{\text{быстр}} = A_1$ . При таком выборе коэффициентов учитывалось примерное постоянство плотности потока частиц в быстром и медленном ветре [174] при отношении скоростей примерно в 2 раза и предполагалось, что относительный уровень турбулентности одинаков. Параметр  $\delta$  (угловая ширина области медленного ветра) определялся по наилучшему вписыванию расчетной зависимости  $m(\epsilon)$  в наблюдаемую (приведена на Рисунке 32). На Рисунке 33 показаны теоретические зависимости индекса межпланетных мерцаний при



**Рисунок 31.** Иллюстрация наблюдений межпланетных мерцаний источника, находящегося в направлении  $OZ$  в условиях бимодальной структуры солнечного ветра (затенением выделена область медленного ветра). Совместный результат диссертанта из работы [154].



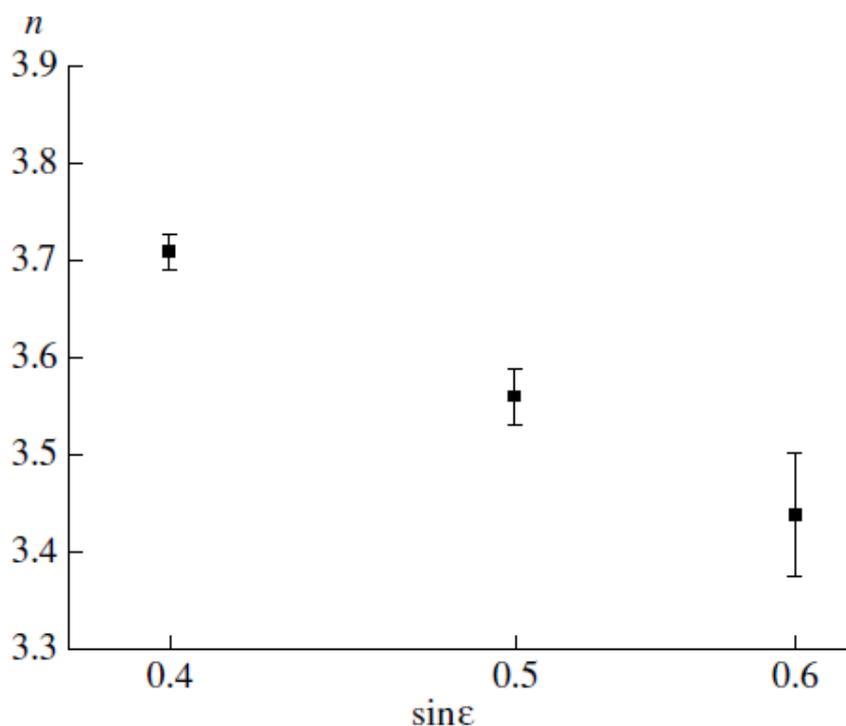
**Рисунок 32.** Зависимость индекса межпланетных мерцаний от элонгации в период апрель–май 2007–2009 гг. для источника 3C 48. По обеим осям — логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [154].



**Рисунок 33.** Зависимость индекса мерцаний от элонгации для различных параметров  $\delta$  (в градусах). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

различных значениях параметра  $\delta$ . Так как мы не знаем точное значение констант интегрирования, то значение индекса мерцаний при  $\varepsilon = 20^\circ$  принято равным 1. При сравнении экспериментальной зависимости с теоретическими проводится процедура масштабирования. Угловой размер источника при этом, как и ранее, принимался равным  $\langle \theta_0 \rangle = 0.326''$ . Наилучшее вписывание соответствует значению  $\delta \approx 25^\circ$ , которое представляется вполне разумным. Далее по описанной выше процедуре, но для модели на Рисунке 31, определялась скорость неоднородностей, которая в данном случае имеет смысл взвешенной по уровню турбулентности, и спектральный индекс турбулентности  $n$ .

Результаты моделирования с учетом бимодальной структуры представлены на Рисунке 34. Существенных отличий в зависимости спектрального индекса турбулентности плазмы от элонгации для экспериментальных точек (Рисунок 30) и после учета реально наблюдаемой бимодальной структуры солнечного ветра в годы минимума солнечной активности (Рисунок 34) не наблюдается. Отсутствие

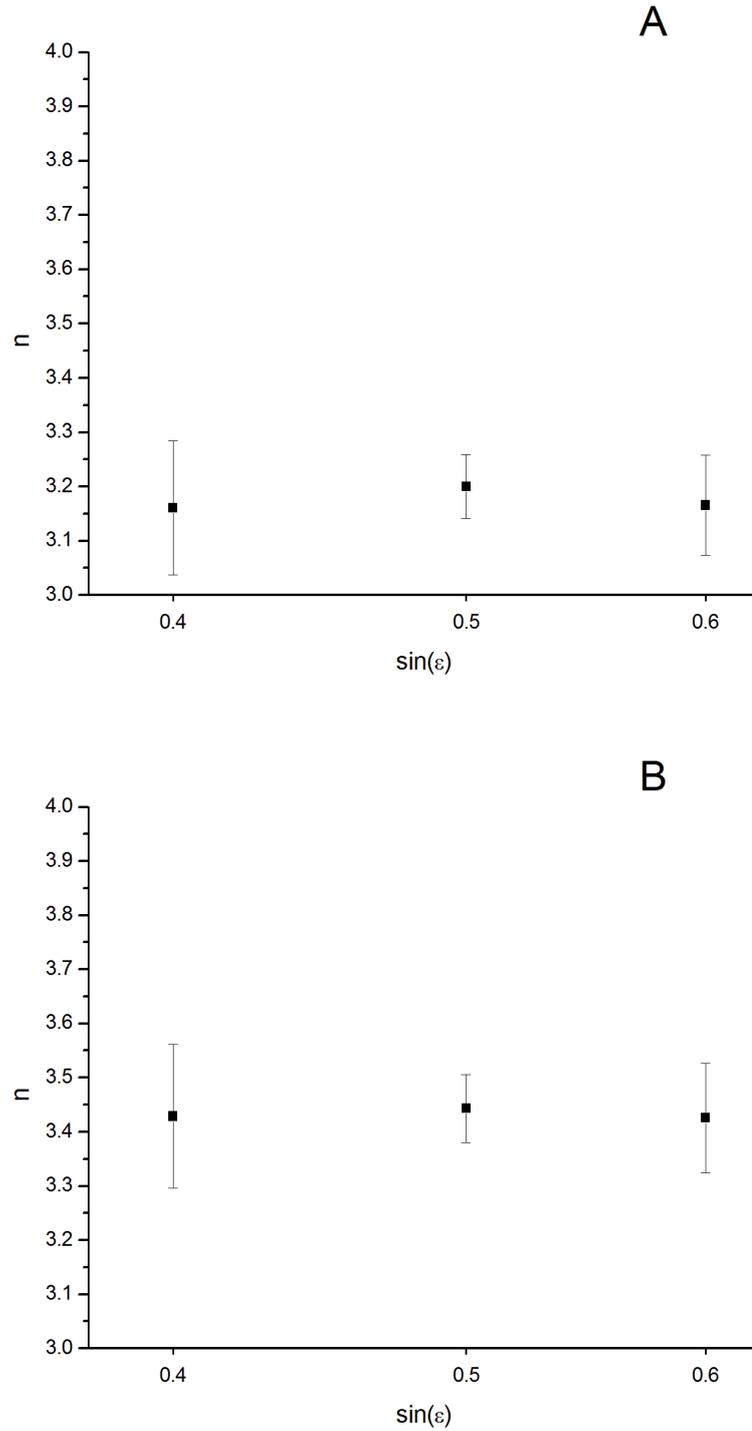


**Рисунок 34.** Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от элонгации с учетом бимодальной структуры солнечного ветра для источника 3С 48. По оси абсцисс— логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [154].

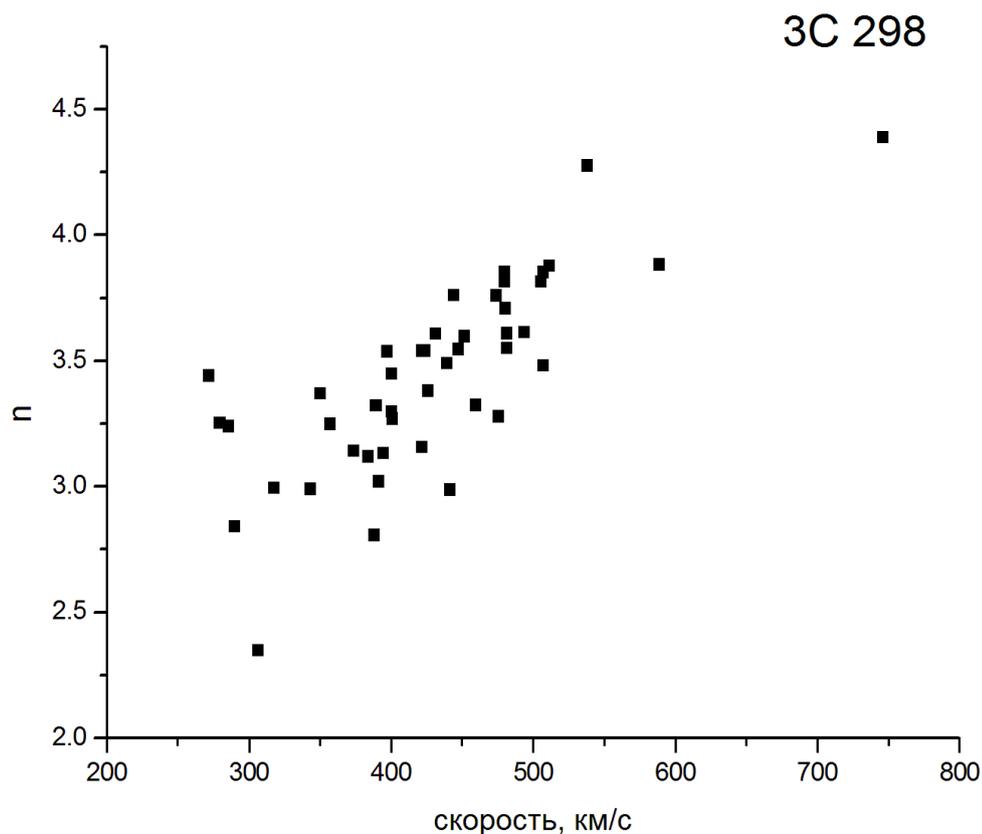
различий говорит о том, что бимодальная структура солнечного ветра на тех элонгациях, где проведены наблюдения ( $20^{\circ} - 40^{\circ}$ ), существенно не влияет на полученную зависимость для спектрального индекса турбулентности. Таким образом, можно утверждать, что зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра является реальным эффектом.

В результате анализа спектров мощности, получена оценка углового размера радиоисточника 3С 298  $\theta_0 = 0.25''$ , которая хорошо согласуется с результатами других авторов. Имеются интерферометрические наблюдения этого источника на более высоких частотах, 327 МГц, 608 МГц, 1,7 ГГц, 5 ГГц, результаты которых приведены в [178-180].

На Рисунке 35 показана зависимость спектрального индекса турбулентности от элонгации без поправки (А) и с поправкой  $\Delta n$  (В). Что касается отсутствия зависимости спектрального индекса турбулентности от элонгации, то это можно объяснить тем, что наблюдения проводились в другой период, для которого, по-



**Рисунок 35.** Зависимость спектрального индекса турбулентности от элонгации для источника 3С 298. По оси абсцисс— логарифмический масштаб. Исходные результаты (А); результаты с учетом поправки влияния шума (В). Совместный результат диссертанта из работы [155].



**Рисунок 36.** Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра для источника 3C 298. Совместный результат диссертанта из работы [155].

видимому, существовали разные скорости солнечного ветра, но они не столь четко выстроены по широте как для случая 3C 48.

Зависимость спектрального индекса турбулентности плазмы от наблюдаемой скорости солнечного ветра представлена на Рисунке 36. Мы видим, что спектральный индекс турбулентности уменьшается при переходе из быстрого высокоширотного в медленный низкоширотный солнечный ветер.

Тенденция уменьшения значения спектрального индекса турбулентности с уменьшением скорости солнечного ветра такая же, как и для наблюдений источника 3C 48. Полученные результаты могут быть объяснены бимодальной структурой солнечного ветра, которая характерна для периода минимума солнечной активности.

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

В настоящей главе проанализированы результаты двух серий наблюдений мерцаний: в период апрель-май (источник 3C 48), сентябрь-ноябрь 2013 (источник 3C 298), выполненных в период вблизи максимума солнечной активности. Наблюдения проведены на модернизированной антенне БСА ФИАН. По данным GOES [29] в период наблюдений было зарегистрировано несколько вспышек классов X и M.

Элонгации радиоисточников в период наблюдений составляли  $23^{\circ}$ - $40^{\circ}$ . На таких элонгациях мерцания регистрируются с достаточным для анализа спектров превышением над шумами. Данные по наблюдениям мерцаний радиоисточников в переходной зоне между дифракционными и рефракционными мерцаниями ( $\epsilon = 18^{\circ}$  -  $23^{\circ}$ ) были исключены из анализа с тем, чтобы был заведомо реализован режим слабых мерцаний. Для анализа использовались записи с отношением сигнал/шум больше 15. Записи с помехами, зашкалами и другими техническими дефектами исключены из анализа. Полное число используемых записей для радиоисточника 3C 48 составило 34, а для 3C 298 - 36.

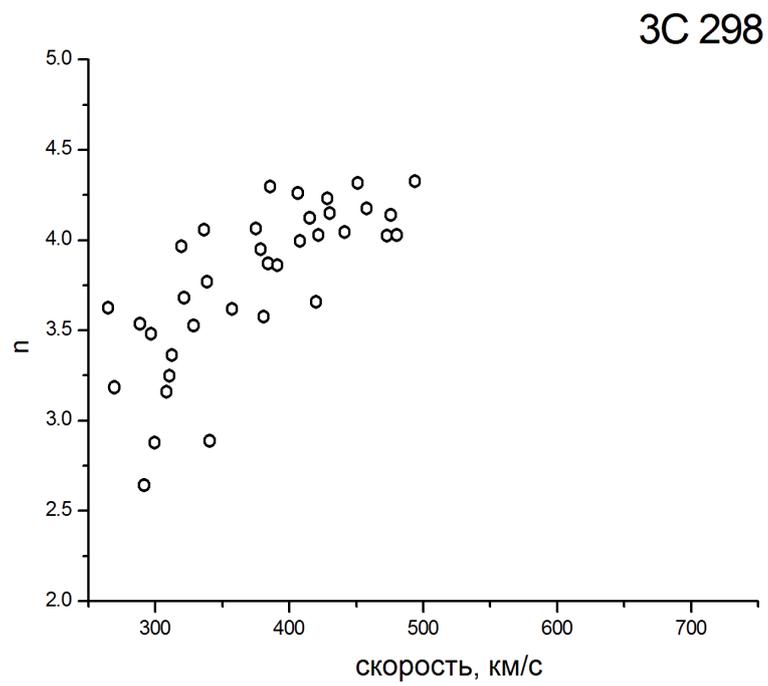
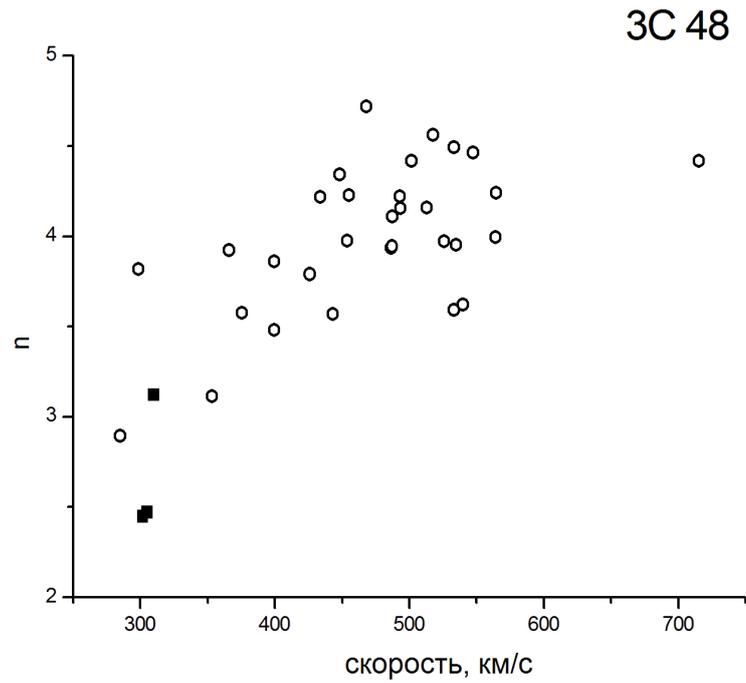
Существует проблема уплощения спектров мощности флуктуаций интенсивности на высоких частотах из-за шумов. При низких значениях отношения сигнал/шум это влияние, которое приводит к систематическому уменьшению оценок показателя степени, становится существенным при определении спектрального индекса турбулентности. Как показано выше, влияние шумов может быть учтено введением зависящей от отношения сигнал/шум поправки  $\Delta\alpha$  к спектральному индексу спектра мощности мерцаний  $\alpha_{изм}$ ,  $\alpha = \alpha_{изм} +$

Да. Спектральный индекс  $\alpha$  связан со спектральным индексом турбулентности простым соотношением  $n = \alpha + 1$  (детали см. в § 2.5).

Значение поправки для спектрального индекса турбулентности зависит от отношения сигнал к шуму в первичной записи. В среднем ее величина равна 0.2, что составляет примерно 5% от значения спектрального индекса турбулентности. Все зависимости для спектрального индекса турбулентности, представленные в настоящей главе, построены с учетом этой поправки.

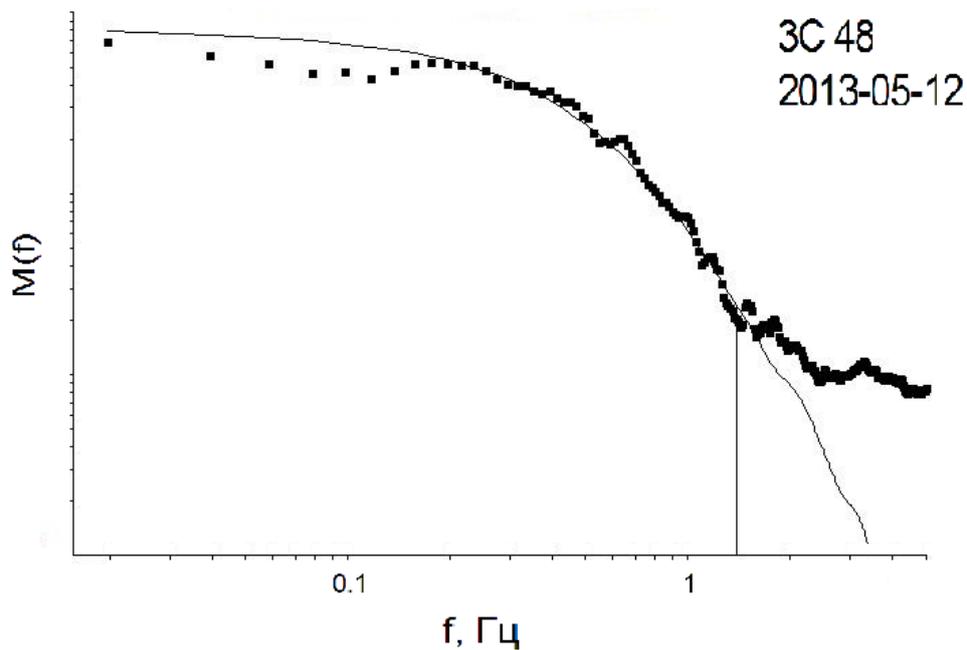
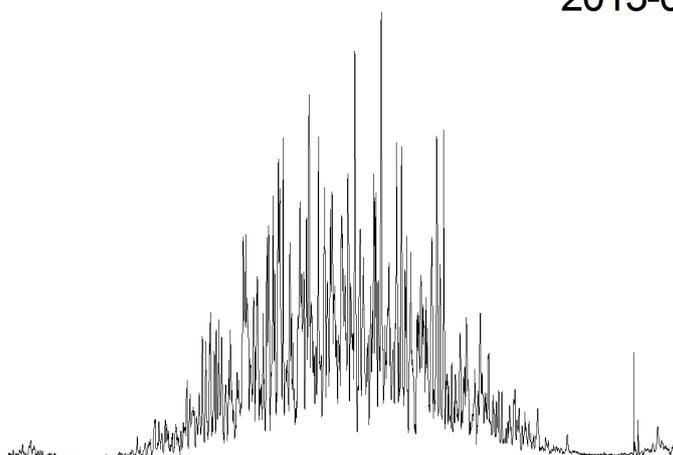
На Рисунке 37 представлены зависимости спектрального индекса турбулентности  $n$  от скорости солнечного ветра. Полые кружки на Рисунках соответствуют дням со спокойным состоянием межпланетной плазмы, черные квадраты - ожидаемое прохождение выброса корональной массы (СМЕ), соответствующее вспышкам класса М и Х по данным GOES [29] и уменьшению индекса Dst [26]. Ожидалось также, что будет наблюдаться и усиление мерцаний радиисточника ЗС 48. Как уже упоминалось, антенна БСА ФИАН является меридианным инструментом. Поэтому для регистрации увеличения индекса мерцаний необходимо проводить наблюдения многих источников на разных элонгациях. Возмущение, распространяющееся в сторону наблюдателя должно отражаться в виде усиления степени мерцаний радиисточников (индекс  $g = m/m_e$ , где  $m$  – наблюдаемый в данный день индекс мерцаний, а  $m_e$  - эталонный индекс мерцаний, соответствующий данной элонгации для данного источника), образуя на  $g$ -картах довольно узкие кольца и дуги. В частности, усиление мерцаний радиисточника ЗС 48 не было подтверждено, хотя сам факт прихода возмущения на Землю был четко зафиксирован по падению Dst-индекса. В то же время на Рисунке 37 видно, что черные квадраты, соответствующие по датам дням прохождения возмущений, концентрируются в области малых скоростей и малых спектральных индексов.

Проанализируем эту зависимость более детально на примере источника ЗС 48. На Рисунках 38 и 39 представлены примеры оригинальных записей и



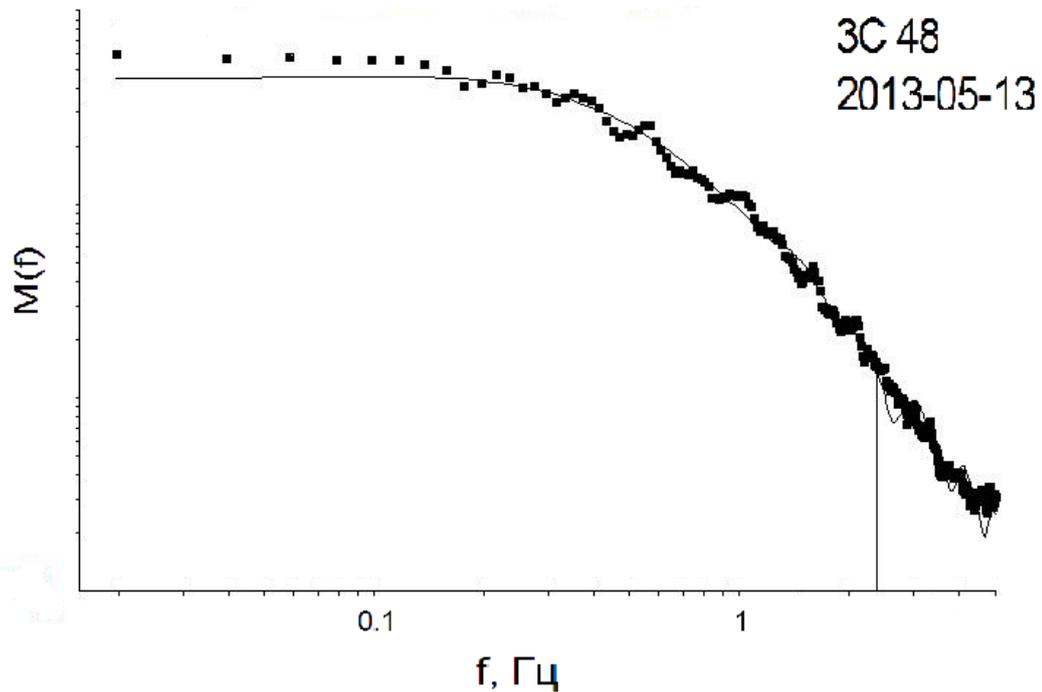
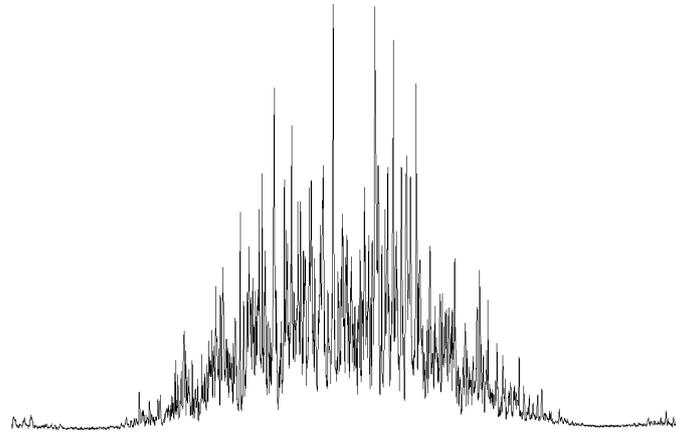
**Рисунок 37.** Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра по наблюдениям источников 3C 48 (апрель-май 2013) и 3C 298 (сентябрь-ноябрь 2013). Совместный результат диссертанта из работы [175].

3C 48  
2013-05-12



**Рисунок 38.** Примеры оригинальных записей и спектров мощности радиосточника 3C 48 за 12 мая 2013. На Рисунке показано вписывание теоретического спектра мощности, вертикальной прямой отмечена область анализа спектра мощности радиосточника. Совместный результат диссертанта из работы [175].

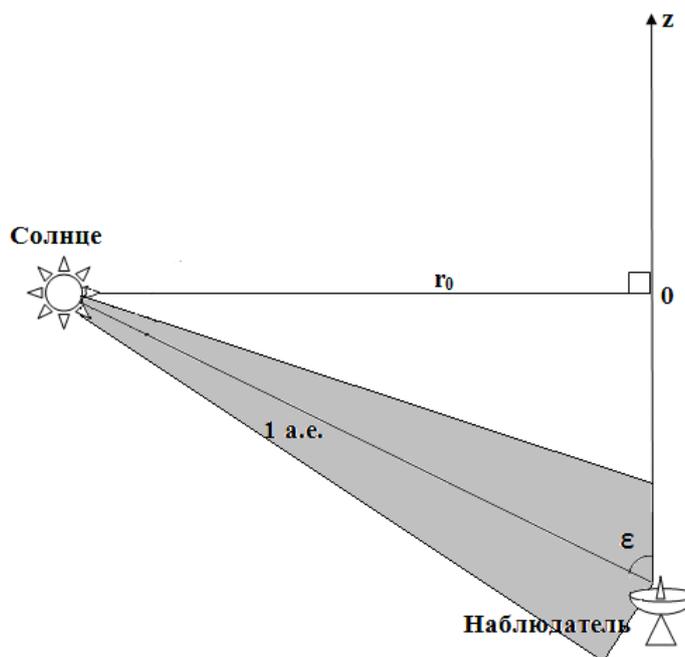
3C 48  
2013-05-13



**Рисунок 39.** Примеры оригинальных записей и спектров мощности радиоисточника 3C 48 за 13 мая 2013. На Рисунке показано вписывание теоретического спектра мощности, вертикальной прямой отмечена область анализа спектра мощности радиоисточника. Совместный результат диссертанта из работы [175].

спектров мощности источника 3С 48 в период относительно спокойного состояния межпланетной плазмы (12 мая 2013 г.;  $n = 3.97$ ,  $v \approx 450$  км/с) и во время прохождения СМЕ (13 мая 2013 г.;  $n = 2.45$ ,  $v \approx 300$  км/с). Из Рисунка видно, что исходные записи и соответствующие им спектры мощности не искажены помехами, отношение сигнал/шум практически совпадает, а спектральные индексы турбулентности отличаются более чем в 1.5 раза.

Предположим, что низкие скорости, оценки которых определяются по спектрам мощности, связаны с прохождением возмущения. Для проверки этого предположения проведем независимую (и самую надежную) оценку средней скорости выбросов корональной массы следующим образом. Мы можем оценить время распространения выброса от Солнца до наблюдателя (рождение возмущения - по рентгеновской вспышке, зафиксированной на спутнике GOES, приход на Землю - по падению Dst-индекса). Средняя скорость распространения выбросов по трем выделенным событиям возмущений (Рисунок 37) составляет 400-900 км/с. Согласно нашим оценкам из спектров мощности мгновенная скорость по этим же трем событиям около 300 км/с. Столь большая разница в оценках скоростей связана с тем, что интерпретация полученных оценок скорости из спектра мощности при прохождении возмущения и в отсутствие возмущений отличается. В модели, используемой в расчетах, солнечный ветер сферически симметричен, что неверно для случая выброса корональной массы. Поэтому занижение скорости неоднородностей и спектрального индекса турбулентности хорошо объясняется эффектом проекции. На Рисунке 40 ось OZ - направление на источник,  $z = 0$  - прицельная точка (ближайшая к Солнцу точка на оси OZ),  $r_0$  - расстояние от Солнца до прицельной точки, 1 а.е. - среднее расстояние между Землей (наблюдателем) и Солнцем,  $\varepsilon$  - элонгация, серым цветом выделена предполагаемая область прохождения СМЕ. Пониженные значения скоростей объясняются тем, что слои, которые вносят существенный вклад в уровень мерцаний, расположены как вблизи прицельной точки, так и гораздо ближе к



**Рисунок 40.** Схема прохождения выброса корональной массы мимо наблюдателя. Совместный результат диссертанта из работы [175].

наблюдателю (Рисунок 40). Определение спектрального индекса турбулентности по временному спектру мерцаний в таких случаях не является корректным, так как форма спектра мерцаний будет существенно зависеть от распределения уровня турбулентности и скорости плазмы на луче зрения.

Для источника ЗС 298 зависимость между спектральным индексом турбулентности и скоростью выражена более заметно, чем для источника ЗС 48.

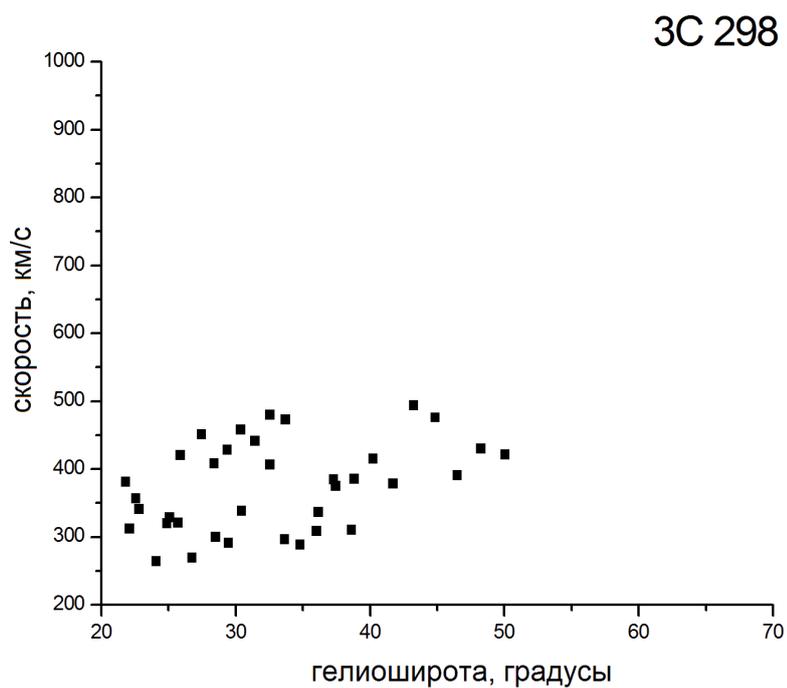
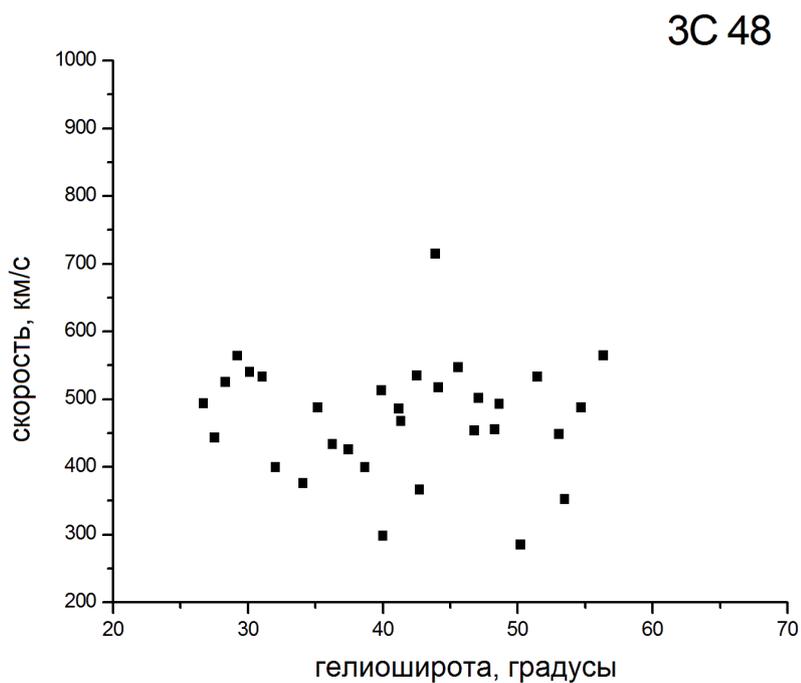
Сравнивая значения скоростей, определенных из спектров мощности по наблюдениям источников ЗС 48 и ЗС 298, легко заметить, что в период наблюдения ЗС 298 скорости солнечного ветра не превышают 500 км/с. Это можно объяснить различием в пространственном распределении межпланетной плазмы, которое связано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

На Рисунке 41 приведены значения скорости солнечного ветра, определенные по временным спектрам мерцаний, при различных гелиоширотах прицельной точки луча зрения для источников 3С 48 и 3С 298. Данные Рисунке 41 отчетливо показывают отсутствие регулярной зависимости скорости солнечного ветра от гелиошироты. Из Рисунка 41 следует, что, в отличие от минимума солнечной активности, когда существует устойчивая бимодальная структура с медленным ветром на низких широтах и быстрым ветром на высоких, в максимуме активности быстрые и медленные потоки могут существовать как на высоких, так и на низких широтах.

В работе [1] приведены наблюдения в период 22 цикла солнечной активности (март- декабрь 1986-1990гг) по наблюдениям на 327 МГц шести компактных источников. Просвечивались области солнечного ветра на расстояниях 70-185  $R_{\odot}$ , что соответствует френелевским частотам 2.69-3.67 Гц. В наших наблюдениях просвечивались области 85-140  $R_{\odot}$ , френелевские частоты - 1.57-1.74 Гц, в период низкой солнечной активности в 23 цикле (2007-2009 гг.) и в период высокой активности Солнца в 24 цикле (2013 г.).

### **§ 4.3. Обсуждение результатов**

Сравним результаты полученные нами и результаты, полученные Манохараном [1]. Характерные размеры неоднородностей, на которых происходят мерцания на частотах 327 МГц и 111 МГц, отличаются примерно в



**Рисунок 41.** Зависимость скорости солнечного ветра от гелиошироты по наблюдениям источников 3C 48 (апрель-май 2013) и 3C 298 (сентябрь-ноябрь 2013). Совместный результат диссертанта из работы [175].

два раза. На частоте 327 МГц можно увидеть мерцания на элонгациях порядка  $10^{\circ}$  -  $15^{\circ}$ , что невозможно на частоте 111 МГц. При этом максимальные используемые элонгации во время наблюдений были примерно одинаковы. В наблюдениях на 327 МГц, как и в наблюдениях на 111 МГц, исключалось возможное влияние возмущений на зависимость.

Есть и различия, связанные со способом обработки наблюдений и с используемыми источниками. Во-первых, Манохаран [1] не делал поправки на высокочастотное уплощение спектра из-за шумов. Заметим сразу, что в обрабатываемых нами записях отношения сигнала к шуму были полтора порядка и при этом средняя поправка всего 5%. Манохараном отбирались записи, где отношение сигнал к шуму было три порядка и поэтому отсутствие поправки принципиально не влияло на полученные результаты. Во-вторых, Манохаран не учитывал возможное влияние бимодальной структуры солнечного ветра на оценки спектрального индекса турбулентности в период низкой активности Солнца. Заметим, что учет бимодальности структуры для источника 3С 48, привел к уменьшению спектрального индекса турбулентности примерно на 0.1 (3%). Заметим также, что в годы активного Солнца выраженная бимодальная структура отсутствует и может быть использована сферически симметричная модель рассеивающей среды. В-третьих, при анализе Манохаран использовал угловые размеры источников, найденные по интерферометрическим (высокочастотным) и IPS (низкочастотным) наблюдениям. Для использованных источников оценки, взятые по интерферометрическим и IPS наблюдениям, могут сильно различаться. Например, источник СТА 21 (4С+16.09) имеет угловые размеры 0.06" по IPS наблюдениям на 102 МГц [169], 0.25" по IPS наблюдениям на 81.5 МГц [176] и примерно 0.01" из анализа интерферометрических наблюдений, проведенных в работе [177]. Так как в IPS наблюдениях на частоте 327 МГц использовалось 6 компактных радиоисточников, то неопределенности в угловых размерах, которые вводились в модель при оценке спектрального индекса турбулентности из спектра мощности мерцаний, могли размыть зависимости. В наших наблюдениях результаты получены по длинным рядам наблюдений. В каждом ряде был лишь

один источник. Если у нас и были погрешности, связанные с неточным знанием размера источника, они могли давать только систематический сдвиг зависимости спектрального индекса турбулентности от скорости, не влияя на ее форму.

Можно заключить, что зависимость между спектральным индексом турбулентности и скоростью сохраняется в различные циклы солнечной активности, в периоды высокой и низкой активности Солнца, на разных частотах наблюдений.

Из приведенных выше результатов следует, что спектральный индекс мелкомасштабной турбулентности плотности в медленном солнечном ветре лучше согласуется с  $n = 7/2$  (спектр Ирошникова-Крэчнана), а в быстром солнечном ветре - с  $n = 11/3$  (колмогоровский спектр). Причина различия, возможно, связана с разным относительным уровнем энергии альвеновских волн. Данные наблюдений межпланетных мерцаний, полученные на различных частотах, могут оказаться полезными при построении теоретических моделей турбулентности солнечного ветра, тем более что этот метод позволяет получать регулярную информацию о флуктуациях плотности плазмы в областях, в настоящее время недоступных для локальных измерений.

### **Выводы**

1. 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.
2. 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 с медленным солнечным ветром на низких гелиоширотах и быстрым ветром на высоких, а в максимуме активности потоки с разными скоростями могут наблюдаться на всех гелиоширотах.

3. Во время прохождения СМЕ временной спектр мощности мерцаний может исказиться, что согласуется и с результатами гл. 3.
4. Уменьшение спектрального индекса турбулентности и скорости неоднородностей во время прохождения СМЕ может быть объяснено эффектом проекции при локализации возмущения в близких к наблюдателю областях луча зрения.
5. При прохождении СМЕ получение информации о скорости неоднородностей межпланетной плазмы и спектрального индекса турбулентности затруднительно, так как пространственное распределение параметров межпланетной плазмы значительно отличается от сферически симметричного случая.

## 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 ЗС 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. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д. и др. Изучение межпланетного ионизационного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете / К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров [и др.] // *Доклады Академии наук СССР*. - 1960. - Т. 131. - №6. - С. 1301.
3. Gringauz K. I. Some results of experiment in interplanetary space by means of charged particle trapce on Soviet Space probe / K. I. Gringauz // *Space Research*. - 1961. - V. 2. - P. 539-553.
4. Bonetti A., Bridge H. S., Lazarus A. J. et al. Explorer 10 plasma measuments / A. Bonetti, H. S. Bridge, A. J. Lazarus [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 1963. - V. 68. - P. 4017-4063.
5. Snyder C. W., Neugebauer M. Interplanetary solar wind measurements by Mariner 2 / C. W. Snyder, M. Neugebauer // *Space Research*. - 1964. - V. 4. - P. 89-113.
6. Neugebauer M., Snyder C. W. Mariner 2 observations of the solar wind, 1. Ayerage properties / M. Neugebauer, C. W. Snyder // *Journal of Geophysical Research*. - 1966. - V. 71. - P. 4469-4489.
7. Neugebauer M., Snyder C. W. Mariner 2 observations of the solar wind, 2. Relation of plasma properties to the magnetic field / M. Neugebauer, C. W. Snyder // *Journal of Geophysical Research*. - 1967. - V. 72. - P. 1832-1828.

8. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер / А. Хундхаузен — М.: Мир, 1976. - 302 с.
9. Брандт Дж. Солнечный ветер / Дж. Брандт — М.: Мир, 1973. – 208 с.
10. Коваленко В. А., Молодых С. И. Энергетический баланс открытых областей короны и солнечного ветра / В. А. Коваленко, С. И. Молодых // Письма в Астрономический журнал. - 1978. - Т. 4. - С. 316-320.
11. Proelss G. W. Physics of the Earth's space environment / G. W. Proelss — Berlin: Springer, 2004. – 513 P.
12. Веселовский И. С. Солнечный ветер. Итоги науки и техники. Исследование космического пространства / И. С. Веселовский — М.: ВИНТИ, 1974. - Т. 4. - С. 7-192.
13. Чертков А. Д. Солнечный ветер и внутреннее строение Солнца / А. Д. Чертков — М: Наука, 1985. – 200 с.
14. Balogh A., Smith E. J., Tsurutani B. T. et al. The heliospheric magnetic field over the south polar region of the sun / A. Balogh, E. J. Smith, B. T. Tsurutani [et al.] // Science. - 1995. - V. 268. - P. 1007–1010.
15. McComas D. J., Elliott H. A., Schwadron N.A. et al. The three-dimensional solar wind around solar maximum / D. J. McComas, H. A. Elliott, N.A. Schwadron [et al.] // Geophysical Research Letters. - 2003. - V. 30. -№10. - P. 1517–1520.
16. Власов В. И. Межпланетная плазма в 11-летнем цикле солнечной активности / В. И. Власов // Геомагнетизм и аэрономия. - 1983. - Т. 23. - С. 475-477.
17. Ефимов А. И., Лотова Н. А. О гелиоширотной зависимости скорости солнечного ветра / А. И. Ефимов, Н. А. Лотова // Геомагнетизм и аэрономия. - 1975. - Т. 15. - С. 731-732.
18. Власов В. И. О гелиоширотной зависимости скорости солнечного ветра / В. И. Власов // Геомагнетизм и аэрономия. - 1975. - Т. 15. - №3. - С. 542-543.
19. Schwenn R. Large-scale structure of the interplanetary medium / R. Schwenn // Physics of the inner heliosphere. — Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. – 99 P.
20. Solar and Heliospheric Observatory, URL: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

21. Tappin S. J., Simnett G. M., Lyons M. A. A determination of the outflow speeds in the lower solar wind / S. J. Tappin, G. M. Simnett, M. A. Lyons // *Astronomy and Astrophysics*. - 1999. - V. 350. - P. 302-309.
22. Ефимов А. И., Чашей И. В., Берд М. К. и др. Турбулентность во внутреннем солнечном ветре по измерениям флуктуаций частоты радиосигналов космических аппаратов Galileo и Ulysses / А. И. Ефимов, И. В. Чашей, М. К. Берд [и др.] // *Астрономический журнал*. - 2005. - Т. 82. - С. 544-554.
23. Guhathakurta M., Fludra A., Gibson E. et al. Physical properties of a coronal hole from a coronal diagnostic spectrometer, Mauna Loa Coronagraph, and LASCO observations during the Whole Sun Month / M. Guhathakurta, A. Fludra, E. Gibson [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 1999. - V. 104. - P. 9801-9808.
24. ACE Real-Time Solar Wind Data, URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/rtsw.html>
25. Solar TERrestrial RELations Observatory, URL: <http://www.stereo.jhuapl.edu/>
26. Real-time (Quicklook) Dst Index Monthly Plot and Table, URL: [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_realtime/presentmonth/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/presentmonth/index.html)
27. Kp index, URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>
28. Hinode| NASA, URL: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hinode/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/index.html)
29. SolarSoft Latest Events, URL: [http://www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events/](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/)
30. Chapman S. Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere / S. Chapman // *Smithsonian Contribution to Astrophysics*. - 1957. - V. 2. - P. 1-11.
31. Chapman S. Interplanetary Space and the Earth's Outermost Atmosphere / S. Chapman // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. - 1959. - V. 253. - P. 462-481.
32. Chapman S. *Space Astrophysics*, ed. W. Liller, McGraw-Hill Book Co., New York. 1961. – 133 P.

33. Behr A., Siedentopf H. Untersuchungen über Zodiakallicht und Gegenschein nach lichtelektrischen Messungen auf dem Jungfraujoch / A. Behr, H. Siedentopf // Zeitschrift für Astrophysik. - 1953. - V. 32. - P. 19-50.
34. Parker E. N. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields / E. N. Parker // Astrophysical Journal. - 1958. - V. 128. - P. 664-675.
35. Parker E. N. Interaction of the Solar Wind with the Geomagnetic Field / E. N. Parker // Physics of Fluids. - 1958. - V. 1. - P. 171-187.
36. Newkirk G. A., Warwick J. W., Zirin H. Backscatter of Cosmic Rays by the Sun's H II Sphere / G. A. Newkirk, J. W. Warwick, H. Zirin // Journal of Geophysical Research. - 1960. - V. 65. - P. 2540.
37. Parker E. N. Dynamical Theory of the Solar Wind / E. N. Parker // Space Science Reviews. - 1965. - V. 4. - P. 666-708.
38. Carovillano R. L., King J. H. On the Solutions of Parker's Hydrodynamic Theory of Solar and Stellar Winds / R. L. Carovillano, J. H. King // Astrophysical Journal. - 1965. - V. 141. - P. 526.
39. Noble L. M., Scarf F. L. Conductive Heating of the Solar Wind. 1 / L. M. Noble, F. L. Scarf // Astrophysical Journal. - 1963. - V. 138. - P. 1169.
40. Whang Y. C., Liu C. K., Chang C. C. Viscous Model of the Solar Wind / Y. C. Whang, C. K. Liu, C. C. Chang // Astrophysical Journal. - 1966. - V. 145. - P. 255.
41. Meyer F., Schmidt H. U. Einfluß der Viskosität auf den Sonnenwind / F. Meyer, H. U. Schmidt // Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft. - 1966. - V. 21. - P. 96.
42. Meyer F., Schmidt H. U. Berichtigung zum Referat "Einfluß der Viskosität auf den Sonnenwind" in Mitteilungen der Astron. Ges. 21, 96 (1966) / F. Meyer, H. U. Schmidt // Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft. - 1968. - V. 25. - P. 228.
43. Pneuman G. W., Kopp R. A. Gas-magnetic field interactions in the solar corona / G. W. Pneuman, R. A. Kopp // Solar Physics. - 1971. - V. 18. - Issue 2. - P. 258-270.

44. Axford W. I., Dessler A. J., Gottlieb B. Termination of Solar Wind and Solar Magnetic Field / W. I. Axford, A. J. Dessler, B. Gottlieb // *Astrophysical Journal*. - 1963. - V. 137. - P. 1268.
45. Weber E. J., Davis L. The Angular Momentum of the Solar Wind / E. J. Weber, L. Davis // *Astrophysical Journal*. - 1967. - V. 148. - P. 217-227.
46. Modisette J. L. Solar Wind Induced Torque on the Sun / J. L. Modisette // *Journal of Geophysical Research*. - 1967. - V. 72. - P. 1521.
47. Brandt J. C., Wolff C., Cassinelli J. P. Interplanetary Gas. XVI. a Calculation of the Angular Momentum of the Solar Wind / J. C. Brandt, C. Wolff, J. P. Cassinelli // *Astrophysical Journal*. - 1969. - V. 156. - P. 1117.
48. Schubert G., Coleman P. J. The Angular Momentum of the Solar Wind / G. Schubert, P. J. Coleman // *Astrophysical Journal*. - 1968. - V. 153. - P. 943.
49. Hartle R. E., Sturrock P. A. Two-Fluid Model of the Solar Wind / R. E. Hartle, P. A. Sturrock // *Astrophysical Journal*. - 1968. - V. 151. - P. 1155.
50. Jensen E. Mass losses through evaporation from a completely ionized atmosphere with applications to the solar corona / E. Jensen // *Astrophysica Norvegica*. - 1963. - V. 8. - P. 99.
51. Brandt J. C., Cassinelli J. P. Interplanetary Gas. XI. An Exospheric Model of the Solar Wind / J. C. Brandt, J. P. Cassinelli // *Icarus*. - 1966. - V. 5. - P. 47.
52. Кутузов А. С., Чашей И. В. О теплопроводной модели солнечного ветра / А. С. Кутузов, И. В. Чашей // *Геомагнетизм и аэрономия*. - 1995. - Т. 35. - С. 36.
53. Axford W. I., Leer E., Skadron G. The acceleration of cosmic rays by shock waves / W. I. Axford, E. Leer, G. Skadron // *Proc. 15th ICRC*. - 1977. - V. 11. - P. 132–137.
54. Steinolfson R. S., Suess S. T., Wu S. T. The steady global corona / R. S. Steinolfson, S. T. Suess, S. T. Wu // *Astrophysical Journal*. - 1982. - V. 255(2). - Pt. 1. - P. 730–742.
55. Hollweg J. V. Some physical processes in the solar wind / J. V. Hollweg // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. - 1978. - V. 16. - P. 689.

56. Коваленко В. А. Солнечный ветер / В. А. Коваленко — М.: Наука, 1983. - 272 с.
57. Чашей И. В., Шишов В. И. Формирование потоков массы и энергии солнечного ветра в модели с волновым источником / И. В. Чашей, В. И. Шишов // Геомагнетизм и аэрномия. - 1987. - Т. 27. - С. 705.
58. Чашей И. В., Шишов В. И. О потоке энергии МГД-волн, выходящем в корону Солнца / И. В. Чашей, В. И. Шишов // Астрономический журнал. - 1987. - Т. 64. - С. 398.
59. Чашей И. В., Шишов В. И. Самосогласованная модель спокойной солнечной короны с волновым источником энергии / И. В. Чашей, В. И. Шишов // Астрономический журнал. - 1988. - Т. 65. - С. 157.
60. Sandbaek O., Leer E. Coronal Heating and Solar Wind Energy Balance / O. Sandbaek, E. Leer // Astrophysical Journal. - 1995. - V. 454. - P. 486.
61. Кутузов А. С., Чашей И. В. Формирование корны и ускорение солнечного ветра волновыми источниками энергии-импульса / А. С. Кутузов, И. В. Чашей // Геомагнетизм и аэрномия. - 1998. - Т. 38. - С. 1.
62. 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 / I. S. Veselovsky, A. T. Lukashenko // Solar System Research. - 2012. - V. 46. - Issue 2. - P. 149-159.
63. Veselovsky I. S. Origin of the solar wind: Astrophysical and plasma-physical aspects of the problem / I. S. Veselovsky // Geomagnetism and Aeronomy. - 2009. - V. 49. - Issue 8. - P. 1148-1153.
64. Coleman P. J. Turbulence, viscosity and dissipation in the solar wind plasma / P. J. Coleman // Astrophysical Journal. - 1968. - V. 153. - P. 371.
65. Siscoe G. L., Davis L. J., Coleman P. J. et al. Power spectra and discontinuities in the interplanetary magnetic field: Mariner 4 / G. L. Siscoe, L. J. Davis, P. J. Coleman [et al.] // Journal of Geophysical Research. - 1968. - V. 73. - P. 61.
66. Leamon R. J., Smith C. W., Ness N. F. et al. Observational constrains on the dynamics of the interplanetary magnetic field dissipation range / R. J. Leamon, C.

- W. Smith, N. F. Ness [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 1998. - V. 103. - P. 4775.
67. Leamon R. J., Smith C. W., Ness N. F. et al. Dissipation range dynamics: kinetic Alfvén waves and the importance of  $\beta_e$  / R. J. Leamon, C. W. Smith, N. F. Ness [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 1999. - V. 104. - P. 22331.
68. Denskat K. U., Beiroth H. J., Neubauer F. M. Interplanetary magnetic field power spectra with frequencies from  $2.4 \times 10^{-5}$  Hz to 470 Hz from Helios-observations during solar minimum conditions / K. U. Denskat, H. J. Beiroth, F. M. Neubauer // *Journal of Geophysics*. - 1983. - V. 54. - P. 60.
69. 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 / K. U. Denskat, F. M. Neubauer // *Journal of Geophysical Research*. - 1982. - V. 87. - P. 2215.
70. Klein L. W., Roberts D. A., Goldstein M. L. Anisotropy and minimum variance directions of solar wind fluctuations in the inner heliosphere / L. W. Klein, D. A. Roberts, M. L. Goldstein // *Journal of Geophysical Research*. - 1991. - V. 96. - P. 3779.
71. Horbury T. S., Balogh A. Evolution of magnetic field fluctuations in high-speed solar wind streams: Ulysses and Helios observations / T. S. Horbury, A. Balogh // *Journal of Geophysical Research*. - 2001. - V. 106. - P. 15929.
72. Horbury T. S., Balogh A., Forsyth R. J. et al. Magnetic field signatures of unevolved turbulence in the solar polar flows / T. S. Horbury, A. Balogh, R. J. Forsyth [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 1996. - V. 101. - P. 405.
73. Horbury T. S., Balogh A., Forsyth R. J. et al. The rate of turbulent evolution over the Sun's poles / T. S. Horbury, A. Balogh, R. J. Forsyth [et al.] // *Astronomy and Astrophysics*. - 1996. - V. 316. - P. 333.
74. Sari J. W., Valley G. C. Interplanetary magnetic field power spectra: Mean field radial or perpendicular to radial / J. W. Sari, G. C. Valley // *Journal of Geophysical Research*. - 1976. - V. 81. - Issue A31. - P. 5489-5500.

75. Tu C.-Y., Marsch E. MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: observations and theories / C.-Y. Tu, E. Marsch // *Space Science Reviews*. - 1995. - V. 73. - P. 1-210.
76. Belcher J. W., Davis L. J. Large amplitude Alfvénic waves in the interplanetary medium / J. W. Belcher, L. J. Davis // *Journal of Geophysical Research*. - 1971. - V. 76. - P. 3534.
77. Marsch E., Mangeney A. Ideal MHD equations in terms of compressive Elsasser variables / E. Marsch, A. Mangeney // *Journal of Geophysical Research*. - 1987. - V. 92. - P. 7363.
78. Marsch E., Tu C.-Y. Dynamics of correlation functions with Elsasser variables for inhomogeneous MHD turbulence / E. Marsch, C.-Y. Tu // *Journal of Plasma Physics*. - 1989. - V. 41. - P. 479.
79. Tu C.-Y., Marsch E. Transfer equations for spectral densities of inhomogeneous MHD turbulence / E. Marsch, C.-Y. Tu // *Journal of Plasma Physics*. - 1990. - V. 44. - P. 103.
80. Intrilligator D. S., Wolfe J. H. Preliminary power spectra of the interplanetary plasma / D. S. Intrilligator, J. H. Wolfe // *Astrophysical Journal*. - 1970. - V. 162. - No. 3. - P. L187-L190.
81. Intrilligator D. S. Direct observations of higher frequency density fluctuations in the interplanetary plasma / D. S. Intrilligator // *Astrophysical Journal*. - 1975. - V. 196. - No. 3. - pt. 1. - P. 879-882.
82. Unti T. W. J., Neugebauer M., Goldstein B. E. Direct measurements of solar wind fluctuations between 0.0048 and 13.3 Hz / T. W. J. Unti, M. Neugebauer, B. E. Goldstein // *Astrophysical Journal*. - 1973. - V. 180. - No. 2. - pt. 1. - P. 590-598.
83. Шевырев Н. Н. Волны зеркальной моды в магнитослое Земли по наблюдениям на спутнике Интербол-1 / Н. Н. Шевырев // *Космические исследования*. - 2005. - Т. 43. - №4. - С. 306–313.
84. Чашей И. В., Шишова Т. Д., Аванов Л. А. Спектры флуктуаций плотности межпланетной плазмы по измерениям на спутнике «Прогноз 8» / И. В.

- Чашей, Т. Д. Шишова, Л. А. Аванов // Космические исследования. - 1988. - Т. 26. - № 2. - С.289-297.
85. Zurbuchen T., Zastenker G., Eiges P. Features of small scale solar wind mass flux fluctuations / T. Zurbuchen, G. Zastenker, P. Eiges // Proceedings of Solar Wind 8 Conference. ed. M. Neugebauer. AIP press. - 1996. - P. 367-370.
86. Рязанцева М. О., Далин П. А., Застенкер Г. Н. и др. Свойства резких и больших скачков потока ионов (плотности) солнечного ветра / М. О. Рязанцева, П. А. Далин, Г. Н. Застенкер [и др.] // Космические исследования. - 2003. - Т. 41. - №4. - С. 371-381.
87. Riazantseva M. O., Zastenker G. N., Richardson J. D. et al. Sharp boundaries of small- and middle-scale solar wind structures / M. O. Riazantseva, G. N. Zastenker, J. D. Richardson [et al.] // Journal of Geophysical Research. - 2005. - V. 110. - No. A12. - P. 11307-11312.
88. Виткевич В. В. Новый метод исследования солнечной короны / В. В. Виткевич // Доклады Академии наук СССР. - 1951. - Т. 77. - С. 585.
89. Виткевич В. В. Результаты наблюдений рассеяния радиоволн на неоднородностях солнечной короны / В. В. Виткевич // Доклады Академии наук СССР. - 1955. - Т. 101. - С. 429.
90. Гочелашвили К. С., Шишов В. И. Волны в случайно-неоднородных средах / К. С. Гочелашвили, В. И. Шишов –М.: ВИНТИ, 1981. - 142 с.
91. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский –М.: Наука, 1967. - 548 с.
92. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч II. Случайные поля / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский – М.: Наука. 1978, - 463 с.
93. Бабий В. И., Виткевич В. В., Власов В. И. и др. Сверхкорона Солнца по наблюдениям 1959-1963 гг. / В. И. Бабий, В. В. Виткевич, В. И. Власов [и др.] // Астрономический журнал. - 1965. - Т. 42. - № 1. - С. 107-116.
94. Vitkevich V. V. Solar-Terr. Symposium, Dordrecht, D. Reidel, 1971. - P. 49.

95. Rickett B. J. Power spectrum of density irregularities in the solar wind plasma / B. J. Rickett // *Journal of Geophysical Research*. - 1973. - V. 78. - P. 1543.
96. Виткевич В. В., Власов В. И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967-1969 гг. / В. В. Виткевич, В. И. Власов // *Астрономический журнал*. - 1972. - Т. 49. - С. 595.
97. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические наблюдения солнечного ветра / В. В. Виткевич, В. И. Власов // *Астрономический циркуляр*. - 1966. - Т. 396. - С. 1-4.
98. Dennison P. A., Hewish A. The Solar Wind outside the Plane of the Ecliptic / P. A. Dennison, A. Hewish // *Nature*. - 1967. - V. 213. - P. 343.
99. Slee O. B., Higgins C. S. The solar wind and Jovian decametric radio emission / O. B. Slee, C. S. Higgins // *Australian Journal of Physics*. - 1968. - V. 21. - P. 341.
100. Hewish A., Symonds M. D. Radio investigation of the solar plasma / A. Hewish, M. D. Symonds // *Planetary and Space Science*. - 1969. - V. 17. - P. 313.
101. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические исследования дрейфа неоднородностей межпланетной плазмы / В. В. Виткевич, В. И. Власов // *Астрономический журнал*. - 1969. - Т. 46. - С. 851-861.
102. Coles W. A., Maagoe S. Solar-wind velocity from IPS observations / W. A. Coles, S. Maagoe // *Journal of Geophysical Research*. - 1972. - V. 77. - С. 5622.
103. Coles W. A., Rickett B. J., Rumsey V. H. Доклад на 3-й конференции по солнечному ветру // Калифорния. США. - 1974.
104. Watanabe T., Shibasaki K., Kakinuma T. Latitudinal distribution of solar wind velocity and its relation to solar EUV corona / T. Watanabe, K. Shibasaki, T. Kakinuma // *Journal of Geophysical Research*. - 1974. - V. 79. - Issue 25. - P. 3841.
105. Jokipii J. R., Hollveg J. V. Interplanetary scintillations and the structure of solar wind fluctuations / J. R. Jokipii, J. V. Hollveg // *Astrophysical Journal*. - 1970. - V. 160. - № 2. - Pt. 1. - P. 745-753.

106. Lovelace R. V. E., Salpeter E. E., Sharp L. E. et al. Analysis of observations of interplanetary scintillations / R. V. E. Lovelace, E. E. Salpeter, L. E. Sharp [et al.] // *Astrophysical Journal*. - 1970. - V. 159. - № 3. - Pt. 1. - P. 1047-1055.
107. Cronin W. M. The analysis of the radio scattering and space-probe observations of small-scale structure in the interplanetary medium / W. M. Cronin // *Astrophysical Journal*. - 1970. - V. 161. - № 2. - Pt. 1. - P. 755-763.
108. Шишова Т. Д. Спектры мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы / Т. Д. Шишова // *Астрономический циркуляр*. - 1974. - Т. 819. - С.1-3.
109. Coles W. A. Interplanetary scintillations / W. A. Coles // *Space Science Reviews*. - 1978. - V. 21. - P. 411.
110. Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И. и др. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным / В. И. Власов, И. В. Чашей, В. И. Шишов [и др.] // *Геомагнетизм и аэрономия*. - 1979. - Т. 19. - С. 401-424.
111. Лотова Н. А. Современные представления о спектре неоднородностей межпланетной плазмы / Н. А. Лотова // *Успехи физических наук*. - 1975. - Т. 115. - № 4. - С. 603-620.
112. Алтунин В. И., Дементьев А. Ф., Липатов Б. Н. и др. Исследование неоднородностей плазмы солнечного ветра методом РСДБ на длинах волн 18 и 92 см в 1994-1996 гг. / В. И. Алтунин, А. Ф. Дементьев, Б. Н. Липатов [и др.] // *Известия ВУЗов Радиофизика*. - 2000. - Т. 43. - №3. - С. 197-206.
113. Chashei I. V., Efimov A. I., Samoznaev L. N. et al. The spectrum of magnetic field irregularities in the solar corona and in interplanetary space / I. V. Chashei, A. I. Efimov, L. N. Samoznaev [et al.] // *Advances in Space Research*. - 2000. - V. 25. - P.1973-1978.
114. Hollweg J. V., Bird M. K., Volland H. et al. Possible evidence for coronal Alfvén waves / J. V. Hollweg, M. K. Bird, H. Volland [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 1982. - V. 87. - P. 1.

115. Ефимов А. И., Чашей И. В., Шишов В. И. и др. О флуктуациях фарадеевского вращения при радиопросвечивании околосолнечной плазмы / А. И. Ефимов, И. В. Чашей, В. И. Шишов [и др.] // Письма в Астрономический журнал. - 1993. - Т. 19. - С. 143.
116. Ефимов А. И., Андреев В. Е., Самознаев Л. Н. и др. Влияние корональных магнитных полей на формирование солнечного ветра по данным поляризационного радиопросвечивания / А. И. Ефимов, В. Е. Андреев, Л. Н. Самознаев [и др.] // Астрономический журнал. - 1999. - Т. 76. - С. 312.
117. Efimov A. I., Andreev V. E., Samoznaev L. N. et al. Alfvén waves in the solar corona according to two-station Faraday rotation observations / A. I. Efimov, V. E. Andreev, L. N. Samoznaev [et al.] // Physics and Chemistry of the Earth. - 2000. - V. 25. - P. 107.
118. Чашей И. В., Шишов В. И., Алтынцев А. Т. Видимые угловые размеры источников микроволновых субсекундных импульсов и флуктуации электронной концентрации в нижней короне Солнца / И. В. Чашей, В. И. Шишов, А. Т. Алтынцев // Астрономический журнал. - 2006. - Т. 83. - №3. - С. 249-254.
119. Gapper G. R., Hewish A., Purvis A. et al. Observing interplanetary disturbances from the ground / G. R. Gapper, A. Hewish, A. Purvis [et al.] // Nature. - 1982. - V. 296. - № 4. - P. 633–636.
120. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. О крупномасштабной структуре солнечного ветра / В. И. Власов, В. И. Шишов, Т. Д. Шишова // Письма в Астрономический журнал. - 1976. - Т. 2. - № 5. - С. 248–250.
121. Власов В. И. Межпланетная плазма в 11-летнем цикле солнечной активности / В. И. Власов // Геомагнетизм и аэрономия. - 1983. - Т. 23. - С. 475-477.
122. Власов В. И. Межпланетные ударные волны по наблюдениям мерцаний радиоисточников / В. И. Власов // Геомагнетизм и аэрономия. - 1981. - Т. 21. - № 10. - С. 927–929.

123. Власов В. И. О возможности прогнозирования геофизической активности по межпланетным мерцаниям / В. И. Власов // Геомагнетизм и аэрномия. - 1981. - Т. 21. - С. 441-444.
124. Janaradhan P., Bakasubramanian V., Ananthakrishnan S. et al. Traveling interplanetary disturbances detected using interplanetary scintillation at 327 MHz / P. Janaradhan, V. Bakasubramanian, S. Ananthakrishnan [et al.] // Solar Physics. - 1996. - V. 166. - № 7. - P. 379–401.
125. Manoharan P. K., Ananthakrishnan S., Dryer M. et al. Solar Wind Velocity and Normalized Scintillation Index from Single-Station IPS Observations / P. K. Manoharan, S. Ananthakrishnan, M. Dryer [et al.] // Solar Physics. - 1995. - V. 156. - P. 377.
126. Manoharan P. K., Pick M. LASCO Consortium. Radio astronomical scintillation in the solar wind plasma: imaging interplanetary disturbances/ P. K. Manoharan, M. Pick // The Universe at low radio frequencies. IAU Symposium. - 2002. - V. 119. - P. 426–429.
127. Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K. et al. Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz / M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki [et al.] // Journal of Geophysical Research. - 2000. - V. 105. - № 5. - P. 10435–10454.
128. Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Артюх В. С. и др. Коэффициент асимметрии межпланетных мерцаний радиоисточников / В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, В. С. Артюх [и др.] // Астрономический вестник. - 2005. - Т. 19. - № 4. - С. 375–380.
129. Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. и др. Наблюдения межпланетных и ионосферных мерцаний ансамбля радиоисточников в режиме мониторинга / В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев [и др.] // Астрономический вестник. - 2008. - Т. 42. - № 4. - С. 363–372.
130. 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. 810-815.
131. IPS Observations of the Solar Wind, URL: [http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips\\_data-e.html](http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips_data-e.html)
132. Бобейко А. Л., Бовкун В. П., Брауде С. Я. и др. Интерферометр декаметрового диапазона волн УРАН-1 / А. Л. Бобейко, В. П. Бовкун, С. Я. Брауде [и др.] // Антенны. - 1978. - Т. 26. - С. 121-134.
133. Mariani M. Computed scintillation spectra for strong turbulence / M. Mariani // Radio Science. - 1975. - V. 10. - P. 115-119.
134. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний: Теория / В. И. Шишов, Т. Д. Шишова // Астрономический журнал. - 1978. - Т. 55. - С. 411. (Influence of source sizes on the spectra of interplanetary scintillations. Theory // Soviet Astronomy. - 1978. - V. 22. - P. 236.)
135. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний: Наблюдения / В. И. Шишов, Т. Д. Шишова // Астрономический журнал. - 1979. - Т. 56. - С. 613. (Influence of source sizes on the spectra of interplanetary scintillations. Observations // Soviet Astronomy. - 1979. - V. 23. - P. 345.)
136. Glyantsev A. V., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V. et al. Determining source angular sizes from interplanetary-scintillation observations in the saturated regime / A. V. Glyantsev, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei [et al.] // Astronomy Reports. - 2013. - V. 57. - Issue 7. - P.509-516.
137. Matthaeus W. H., Goldstein M. L. Low frequency 1/f noise in the interplanetary magnetic field / W. H. Matthaeus, M. L. Goldstein // Physical Review Letters. - 1986. - V. 57. - No. 7. - P. 495-498.
138. Милованов А. В., Аванов Л. А., Застенкер Г. Н. и др. Мультифрактальные свойства турбулентности солнечного ветра: теория и наблюдения / А. В. Милованов, Л. А. Аванов, Г. Н. Застенкер [и др.] // Космические исследования. - 1996. - Т. 34. - №5. - С. 415-419.

139. Ruzmaikin A. A., Goldstein B. E., Smith E. J. On the origin of the  $1/f$  spectrum of fluctuations in the solar wind, in *Solar wind Eight* / A. A. Ruzmaikin, B. E. Goldstein, E. J. Smith // (AIP Conf. Proc. 382). D. Winterhalter et al. (Eds). AIP Press. Woodbury. NY/USA. - 1996. - P. 225.
140. Чашей И. В., Шишов В. И. Турбулентность солнечного ветра в области ускорения / И. В. Чашей, В. И. Шишов // *Астрономический журнал*. - 1983. - Т. 60. - №3. - С. 594-601.
141. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса / А. Н. Колмогоров // *Доклады Академии наук СССР*. - 1941. - Т. 30. - №1. - С. 9-12.
142. Sridhar S., Goldreich P. Toward a theory of interstellar turbulence. 2. Strong alfvénic turbulence / S. Sridhar, P. Goldreich // *Astrophysical Journal*. - 1994. - V.432. - No.9. - pt.2. - P.612-621.
143. Goldreich P., Sridhar S. Toward a theory of interstellar turbulence. 2. Strong alfvénic turbulence / P. Goldreich, S. Sridhar // *Astrophysical Journal*. - 1995. - V.438. - No.1. - pt.2. - P.763-775.
144. Schekochichin A. A., Cowley S. C., Dorland W. et al. Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid cascades in magnetized weakly collisional plasmas / A. A. Schekochichin, S. C. Cowley, W. Dorland [et al.] // *Astrophysical Journal*. Suppl. - 2009. - V.182. - No.5. - P.310-377.
145. Iroshnikov P. S. Turbulence of a Conducting Fluid in a Strong Magnetic Field / P. S. Iroshnikov // *Soviet Astronomy*. - 1964. - V. 7. - P. 566-571.
146. Kraichnan D. H. Inertial-Range Spectrum of Hydromagnetic Turbulence / D. H. Kraichnan // *Physics of Fluids*. - 1965. - V. 8. - №7. - P. 1385 – 1397.
147. Чашей И. В., Шишов В. И. О турбулентности солнечного ветра / И. В. Чашей, В. И. Шишов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. - 1977. - V. 17. - №6. - P. 984-993.

148. Чашей И. В., Шишов В. И. Спектры МГД-турбулентности межпланетной плазмы с учетом нелинейного поглощения / И. В. Чашей, В. И. Шишов // Геомагнетизм и аэрономия. - 1985. - Т.25. - №1. - С.1-6.
149. Boldyrev S. Spectrum of magnetohydrodynamic turbulence / S. Boldyrev // Physical Review Letters. - 2006. - V. 96. - №. 11. - P. 5002.
150. Perez J. K., Boldyrev S. On weak and strong magnetohydrodynamic turbulence / J. K. Perez, S. Boldyrev // Astrophysical Journal. - 2008. - V. 672. - №.1. - P. L61-L64.
151. Ruzmaikin A. A., Feynman J., Goldstein B. E. et al. Intermittent turbulence in solar wind from the south polar hole / A. A. Ruzmaikin, J. Feynman, B. E. Goldstein [et al.] // Journal of Geophysical Research. - 1995. - V. 100. - №. A3. - P.3395-3403.
152. Schwarts St. J. Plasma instabilities in the solar wind / St. J. Schwarts // Reviews of Geophysics and Space Physics. - 1980. - V.18. - №.1. - P. 313 -336.
153. 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.
154. 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. 639-647.
155. 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.

156. Hewish A., Scott P. E., Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources / A. Hewish, P. E. Scott, D. Wills // *Nature*. - 1964. - V. 203. - P. 1214.
157. Власов В. И. Радиоизображения межпланетной турбулентной плазмы / В. И. Власов // *Астрономический журнал*. - 1979. - Т. 56. - № 1. - С. 96-105.
158. Cohen M. H., Clark B. C., Jauncey D. L. Angular Size of 3c 273B / M. H. Cohen, B. C. Clark, D. L. Jauncey // *Astrophysical Journal*. - 1967. - V. 147. - P. 449-456.
159. Шишов В. И. К вопросу о флуктуациях амплитуды при распространении электромагнитных волн в средах со случайными характеристиками / В. И. Шишов // *Труды ФИАН*. - 1967. - Т. 38. - С. 171-176.
160. Шишов В. И. К теории распространения волн в случайных средах / В. И. Шишов // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. - 1968. - Т. 11. - С. 866-875.
161. Chandrasekhar S. A statistical basis for the theory of stellar scintillation / S. Chandrasekhar // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 1952. - V. 112. - P. 475.
162. Salpeter E. E. Interplanetary Scintillations. I. Theory / E. E. Salpeter // *Astrophysical Journal*. - 1967. - V. 147. - P. 433.
163. Виткевич В. В., Илясов Ю. П., Кутузов С. М. и др. Антенно-аппаратурный комплекс БСА ФИАН / В. В. Виткевич, Ю. П. Илясов, С. М. Кутузов [и др.] // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. - 1976. - Т. 19. - № 11. - С. 1595-1606.
164. Кутузов С. М., Азаренков Ю. И., Алексеев И. А. и др. Перестройка радиотелескопа БСА ФИАН в диапазоне 109-113 МГц / С. М. Кутузов, Ю. И. Азаренков, И. А. Алексеев [и др.] // *Труды ФИАН*. - 2000. - Т. 229. - С. 3.
165. Пушинская РадиоАстрономическая Обсерватория, URL: <http://pra0.ru/>
166. Артюх В. С. Исследование галактик и их ядер методом межпланетных мерцаний // *дис. ...д-ра физ.-мат. наук*: 1991. - С. 19-50.

167. Артюх В. С. Исследование радиоизлучения галактик в метровом диапазоне волн методом межпланетных мерцаний / В. С. Артюх // Труды ФИАН. - 1988. - Т. 189. - С. 223-243.
168. Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Артюх В. С. и др. Коэффициент асимметрии межпланетных мерцаний радиоисточников / В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, В. С. Артюх [и др.] // Астрономический вестник. - 2005. - Т. 39. - № 3. - С. 1-6.
169. Артюх В. С., Смирнова Т. В. Межзвездное рассеяние на частоте 102 МГц / В. С. Артюх, Т. В. Смирнова // Письма в астрономический журнал. - 1989. - Т. 15. - С. 797.
170. Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. и др. Результаты наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточника 3С 20, 3С 48, 3С 298 на фазе спада и в минимуме 23 цикла солнечной активности / С. К. Глубокова, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей [и др.] // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. - 2009. - № 219. - С. 5-12.
171. Bisi M. M., ..., Chashei I. V., ..., Glubokova S. K. et al. 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.
172. Чашей И. В., Шишов В. И., ..., Глубокова С. К. и др. 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. К. Глубокова [и др.] // Современные достижения в плазменной гелиогеофизике. - 2015. - Раздел 4. – Режим доступа: <http://sdpg.cosmos.ru/>
173. Ефимов А. И., Самознаев Л. Н., Андреев В. Е. и др. Внешний масштаб турбулентности солнечного ветра по данным радиозатменных экспериментов с использованием космического аппарата «Galileo» / А. И. Ефимов, Л. Н. Самознаев, В. Е. Андреев [и др.] // Астрономический журнал. - 2002. - Т. 79. - № 7. - С. 640–652.

174. McComas D. J., Barraclough B. L., Funsten H. O. et al. Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit / D. J. McComas, B. L. Barraclough, H. O. Funsten [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. - 2000. - V. 105. - P. 10419.
175. 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.
176. Purvis A., Tappin S. J., Rees W. G. et al. The Cambridge IPS survey at 81.5 MHz / A. Purvis, S. J. Tappin, W. G. Rees [et al.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 1987. - V. 229. - P. 589.
177. Artyukh V. S., Tyul'bashev S. A., Chernikov P. A. Investigations of compact steep-spectrum radio sources using 102-MHz interplanetary-scintillation observations / V. S. Artyukh, S. A. Tyul'bashev, P. A. Chernikov // *Astronomy Reports*. - 1999. - V. 43. - Issue 1. - P. 1-12.
178. Nan Rendong, Schilizzi R. T., Fanti C. et al. VLBI observations of 24 3CR CSS radio sources at 50 cm / Nan Rendong, R. T. Schilizzi, C. Fanti [et al.] // *Astronomy and Astrophysics*. - 1991. - V. 252. - P. 513-527.
179. Dallacasa D., Zhengdong Cai, Schilizzi R. T. et al. Global VLBI Images of 14 Compact Steep-Spectrum Radio Sources at 327 MHz / D. Dallacasa, Cai Zhengdong, R. T. Schilizzi [et al.] // *Proceedings of the workshop on Compact Extragalactic Radio Sources (Socorro)*. - 1994. - P. 23.
180. Fanti C., Fanti R., Dallacasa D. et al. Multi-frequency analysis of the two CSS quasars 3C 43 & 3C 298 / C. Fanti, R. Fanti, D. Dallacasa [et al.] // *Astronomy and Astrophysics*. - 2002. - V. 396. - P. 801-813.

## Список использованных сокращений

АКЦ – АстроКосмический Центр

БСА ФИАН – Большая Сканирующая Антенна Физического Института Академии Наук

КА – космический аппарат

МГД - магнитная гидродинамика

МПП - межпланетная плазма

ПРАО – Пушинская РадиоАстрономическая Обсерватория

РСДБ – Радиointерферометрия со СверхДлинными Базами

СМЕ – coronal mass ejection (выброс корональной массы)

Dst - Disturbance storm time index (индекс, характеризующий интенсивность геомагнитных бурь)

ESA - European Space Agency (Европейское космическое агентство)

EUV - extreme ultraviolet (экстремальный ультрафиолет)

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite (КА для исследования солнечной активности, США)

IPS - interplanetary scintillation (межпланетные мерцания)

Kp - квазилогарифмический планетарный индекс

SOHO - Solar and Heliospheric Observatory (КА для наблюдений за Солнцем, NASA-ESA проект)

STEREO - Solar-Terrestrial Relations Observatory (КА для исследования солнечной активности, NASA-ESA проект)

VLA – Very Large Array (система апертурного синтеза, США)

VLBA - Very Large Base Array (РСДБ система апертурного синтеза, США)

**Список таблиц**

1 Средние параметры солнечного ветра, измеренные зондами Helios [19].....	15
---	----

## Список иллюстраций

- |   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | <p>Зависимость скорости солнечного ветра от широты по данным прямых измерений с борта КА «Ulysses». Верхний левый рисунок соответствует периоду минимума солнечной активности (17 августа 1996), а верхний правый – периоду максимума солнечной активности (07 декабря 2000 года). Значения чисел Вольфа показаны в нижней части рисунка. [15].....</p>  | 14 |
| 2 | <p>Линии магнитного поля вокруг Солнца во время минимума солнечной активности. Быстрый ветер выходит из полярных областей, где поле открыто, и медленный ветер выходит из экваториальных областей, где поле более замкнуто. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....</p>  | 15 |
| 3 | <p>Композиция изображений с EUV, полученная 23 декабря 1996 инструментами на КА SOHO. Внутреннее изображение (в центре) показывает корону при температуре около 2-2.5 миллиона градусов. Видно, что электрически заряженный корональный газ дует в сторону от Солнца только за пределами внутреннего темного круга, который обозначает край затмевающего диска инструмента. Можно увидеть три заметных корональных стримера (два на западе и один на востоке). Поле зрения этого прибора охватывает 32 диаметра Солнца. Чтобы представить это в перспективе, диаметр этого изображения 45 миллионов километров от Солнца, или половина диаметра орбиты Меркурия. Виден центр Млечного Пути, а также темная межзвездная пыль, которая простирается с юга на север. На изображении также</p> |    |

	показана Комета SOHO-6 (вытянутая полоса около 7:30 ч), одна из нескольких десятков комет, пролетающих по касательной к Солнцу, обнаруженных SOHO. [20] .....	17
4	Пример регистрации прохождения ударной волны через межпланетную плазму. Точками отмечены положения радиоисточников, у которых наблюдалось увеличение величины индекса мерцаний в данный день по сравнению со значением индекса мерцаний в предыдущий день. Кругом отмечено положение Солнца [122.].....	29
5	Солнечный ветер и распределение средней плотности электронов вдоль луча зрения. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....	38
6	Схема фазового экрана. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....	39
7	Радиотелескоп БСА ФИАН [165].....	43
8	Входной сигнал от мерцающего радиоисточника ЗС 48. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....	45
9	Диаграмма направленности БСА ФИАН. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....	47
10	Вписывание прямых во временной спектр мерцаний источника ЗС 48. Совместный результат диссертанта из работы [130].....	48
11	Иллюстрация наблюдений мерцаний источника на МПП (в случае сферического распределения МПП). Совместный результат диссертанта из работы [154].....	51
12	Пример спектра мощности источника ЗС 48 (точки) и вписанный теоретический спектр мощности (сплошная линия). Уровень	

	шумов указан штриховой линией. Совместный результат диссертанта из работы [154].....	52
13	Теоретические спектры мерцаний для источников разных угловых размеров ( $n = 3.6$ , $v = 400$ км/с). Совместный результат диссертанта из работы [154].....	53
14	Теоретические спектры мерцаний для разных значений скорости неоднородностей солнечного ветра. Скорость солнечного ветра указана в км/с ( $n = 3.6$ , $\theta_0 = 0.1''$ ). Неопубликованный иллюстративный материал, совместный результат диссертанта.....	56
15	Теоретические спектры мерцаний для разных значений спектрального индекса турбулентности ( $v = 400$ км/с , $\theta_0 = 0.1''$ ). Неопубликованный иллюстративный материал, совместный результат диссертанта.....	56
16	Схематическое изображение спектра мощности при отсутствии шума (идеальный случай) и в случае, когда шумы присутствуют. Совместный результат диссертанта из работы [155].....	58
17	Пример спектра мощности источника ЗС 298. Совместный результат диссертанта из работы [155].....	59
18	Примеры типичных записей источников ЗС 48 и ЗС 298. Совместный результат диссертанта из работы [155].....	63
19	Зависимость гелиошироты прицельной точки луча зрения от гелиоцентрического расстояния (в а.е.) при прохождении источников ЗС 298 (а) и ЗС 48 (б). Совместный результат диссертанта из работы [130].....	64
20	Зависимость индекса межпланетных мерцаний от элонгации в полугодичных сериях наблюдений источников ЗС 298 (а – 24 дня) и ЗС 48 (б – 54 дня). Совместный результат диссертанта из работы [130].....	65

- 21 Оценки скорости солнечного ветра, полученные в университете Нагойя методом разнесенного приема (вертикальная ось), и по характерной ширине спектров мерцаний (горизонтальная ось) для источников 3С 298 (а) и 3С 48 (б). Совместный результат диссертанта из работы [130]..... 67
- 22 Положение радиоисточников 3С 20 и 3С 48 в эклиптических координатах во время наблюдений в мае 2005. Совместный результат диссертанта из работы [171]..... 69
- 23 Геометрия лучей зрения во время наблюдений источников 3С 20 и 3С 48. Области эффективной модуляции отмечены сплошными толстыми линиями для каждого источника. Совместный результат диссертанта из работы [171]..... 70
- 24 Индекс мерцаний источников 3С 20 и 3С 48. Совместный результат диссертанта из работы [171]..... 71
- 25 Временные спектры мерцаний радиоисточников 3С 48 и 3С 20. А,В,С – даты наблюдений. Совместный результат диссертанта из работы [171]..... 73
- 26 Гистограмма распределения угловых размеров источника 3С 48. На горизонтальной оси оценка углового размера источника из спектра (в долях угловой секунды), а на вертикальной оси количество оценок. Совместный результат диссертанта из работы [153]..... 78
- 27 Гистограмма распределения значений спектрального индекса турбулентности плазмы по данным наблюдений источника 3С 48. Совместный результат диссертанта из работы [153]..... 78
- 28 Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от скорости солнечного ветра по наблюдениям источника 3С 48. Совместный результат диссертанта из работы [154]..... 79

- 29 Зависимость скорости солнечного ветра от элонгации по данным наблюдений источника 3С 48. По оси абсцисс логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [154]..... 79
- 30 Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от элонгации для источника 3С 48. По оси абсцисс логарифмический масштаб. А - исходные результаты; Б – усредненные результаты. Совместный результат диссертанта из работы [154]..... 81
- 31 Иллюстрация наблюдений межпланетных мерцаний источника, находящегося в направлении *OZ* в условиях бимодальной структуры солнечного ветра (затенением выделена область медленного ветра). Совместный результат диссертанта из работы [154]..... 83
- 32 Зависимость индекса межпланетных мерцаний от элонгации в период апрель–май 2007–2009 гг. для источника 3С 48. По обеим осям — логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [154]..... 83
- 33 Зависимость индекса мерцаний от элонгации для различных параметров  $\delta$  (в градусах). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом..... 84
- 34 Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от элонгации с учетом бимодальной структуры солнечного ветра для источника 3С 48. По оси абсцисс— логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [154]..... 85
- 35 Зависимость спектрального индекса турбулентности от элонгации для источника 3С 298. По оси абсцисс— логарифмический масштаб. Исходные результаты (А); результаты с учетом поправки

	влияния шума (В). Совместный результат диссертанта из работы [155].....	86
36	Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра для источника 3С 298. Совместный результат диссертанта из работы [155].....	87
37	Зависимость спектрального индекса турбулентности от скорости солнечного ветра по наблюдениям источников 3С 48 (апрель-май 2013) и 3С 298 (сентябрь-ноябрь 2013). Совместный результат диссертанта из работы [175].....	90
38	Примеры оригинальных записей и спектров мощности радиоисточника 3С 48 за 12 мая 2013. На Рисунке показано вписывание теоретического спектра мощности, вертикальной прямой отмечена область анализа спектра мощности радиоисточника. Совместный результат диссертанта из работы [175].....	91
39	Примеры оригинальных записей и спектров мощности радиоисточника 3С 48 за 13 мая 2013. На Рисунке показано вписывание теоретического спектра мощности, вертикальной прямой отмечена область анализа спектра мощности радиоисточника. Совместный результат диссертанта из работы [175].....	92
40	Схема прохождения выброса корональной массы мимо наблюдателя. Совместный результат диссертанта из работы [175].юююю.....	94
41	Зависимость скорости солнечного ветра от гелиошироты по наблюдениям источников 3С 48 (апрель-май 2013) и 3С 298 (сентябрь-ноябрь 2013). Совместный результат диссертанта из работы [175].....	96