

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

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 канд. физ.-мат. наук

Петрухина (Глубокова) Светлана Константиновна
Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук Чашей Игорь Владимирович

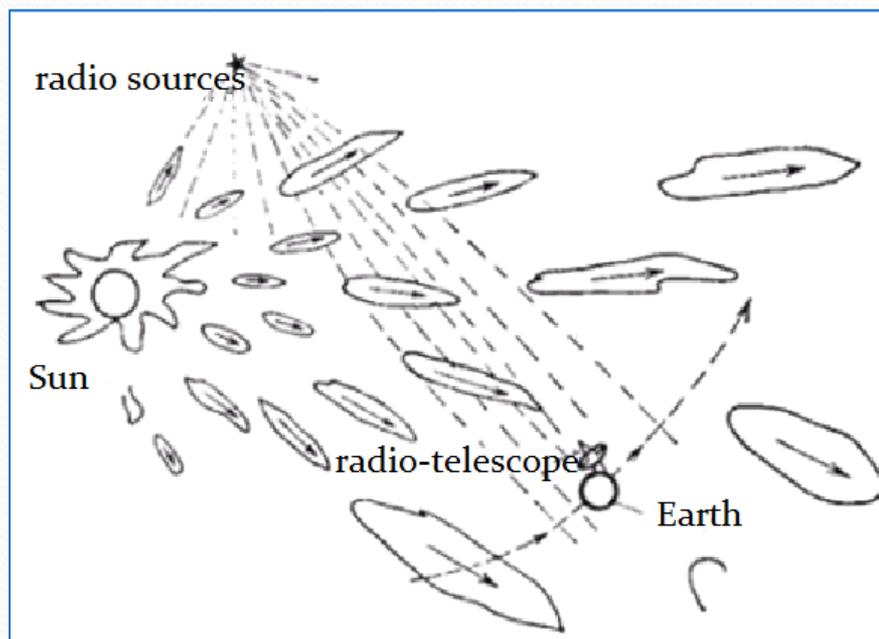


Пушчинская радиоастрономическая обсерватория
Астрокосмического центра Физического института
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Москва — 2016

Межпланетные мерцания (IPS)

Одним из основных свойств плазмы солнечного ветра является турбулентность. Все параметры плазмы: магнитное поле, плотность, скорость и др., флуктуируют на всех доступных для измерений пространственных и временных масштабах. IPS были обнаружены в 1964 г. и с тех пор широко используются для изучения свойств межпланетной плазмы и угловой структуры источников. Мерцания радиоисточников обусловлены дифракцией радиоволн на неоднородностях плотности межпланетной плазмы Френелевского масштаба.



- Уровень мерцаний зависит от углового размера источника. Для изучения IPS используют наблюдения компактных ($< 1''$) радиоисточников, таких как активные ядра галактик.
- Временные характеристики IPS зависят от уровня мелкомасштабной турбулентности плотности, скорости солнечного ветра и угловых размеров источников.

БСА ФИАН



Наблюдения межпланетных мерцаний проведены на радиотелескопе БСА ФИАН, частота 11 МГц, полоса приема 600 кГц, постоянная времени 0.1 с.

Сильные мерцающие источники

3C 048

Type QSO

Z = 0.367000

B1950 01h34m49.8287s +32d54m20.161s

J2000 01h37m41.2994s +33d09m35.134s

3C 298

Type QSO

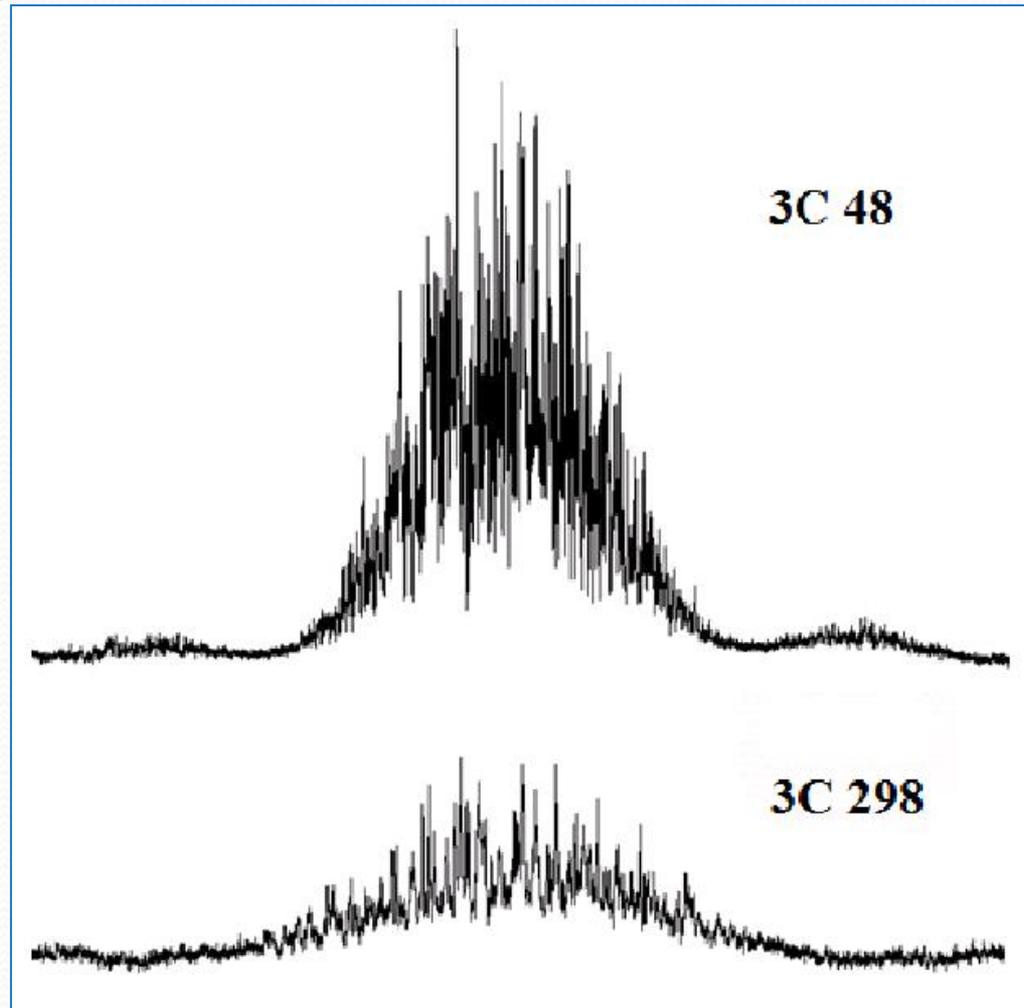
Z = 1.437320

B1950 14h16m38.7809s +06d42m21.023s

J2000 14h19m08.1804s +06d28m34.805s

- Во время наблюдений угловое расстояние между направлениями на Солнце и на источники (элонгация) было 20° - 40° , когда IPS достигают максимального значения.

Примеры записей источников ЗС 048 и ЗС 298



Временной спектр IPS

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

$$\begin{aligned} P(f) &= \int B_I(\tau) \exp(2\pi i f \tau) d\tau, \\ B_I(\tau) &= \langle \delta I(t) \delta I(t + \tau) \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

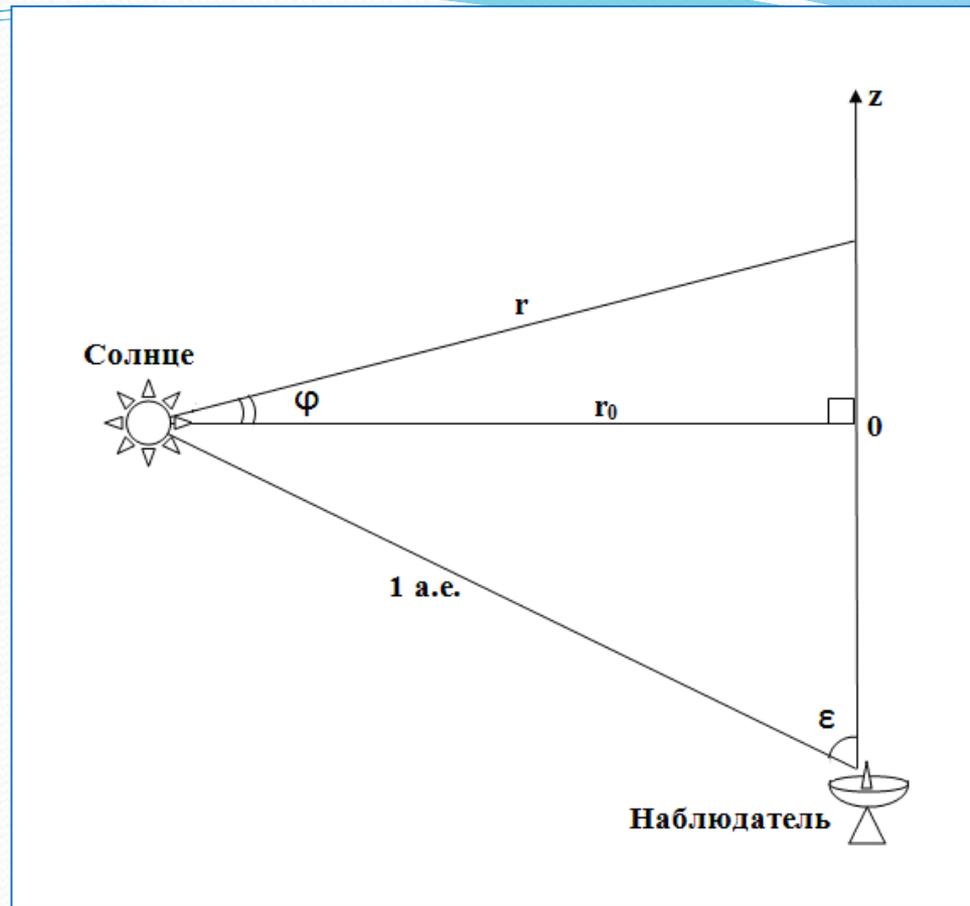
где $I(t)$ - измеряемая плотность потока, а $\delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$ - её временные флуктуации.

В режиме слабых мерцаний для временного спектра справедливо соотношение

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

где f - временная частота, ось OZ - это направление вдоль луча зрения и $z = 0$ находится в прицельной точке, $A(z) = \frac{A_0}{(z^2 + r_0^2)^2} \sim \frac{1}{r_0^4}$, $A_0 = 5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$, $r_0 = \sin \varepsilon \cdot 1AU$, $v_{\perp}(z) = v \cos \varphi = v \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + z^2}}$ - 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, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, $F(\vec{q}) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint d^2\theta \exp[-ikq\theta] I(\theta)$ - пространственный спектр радиисточника, а $I(\theta)$ - распределение яркости по источнику. Зависимость $A(z)$ в (2) соответствует предположениям сферической симметрии, а также не зависящих от расстояния до Солнца значениях скорости солнечного ветра (установившееся течение) и относительного уровня турбулентности.

- 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.)



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

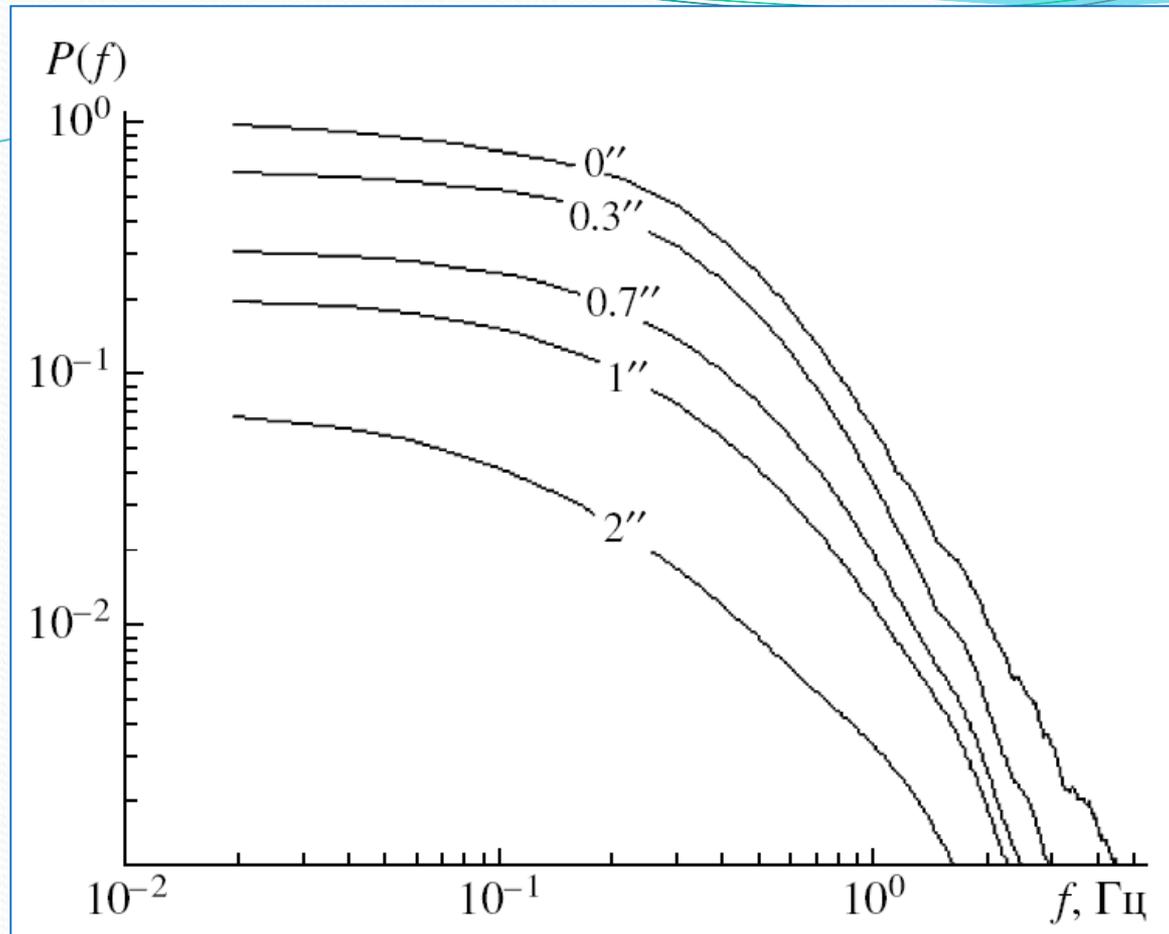
Численное моделирование временных спектров мощности IPS (уравнение (2)) для источников различных угловых размеров проводилось в следующих предположениях:

1) трехмерный пространственный спектр турбулентности МПП является степенным, $\Phi_e(q, q_z = 0) = Cq^{-n}$, где C - структурная константа;

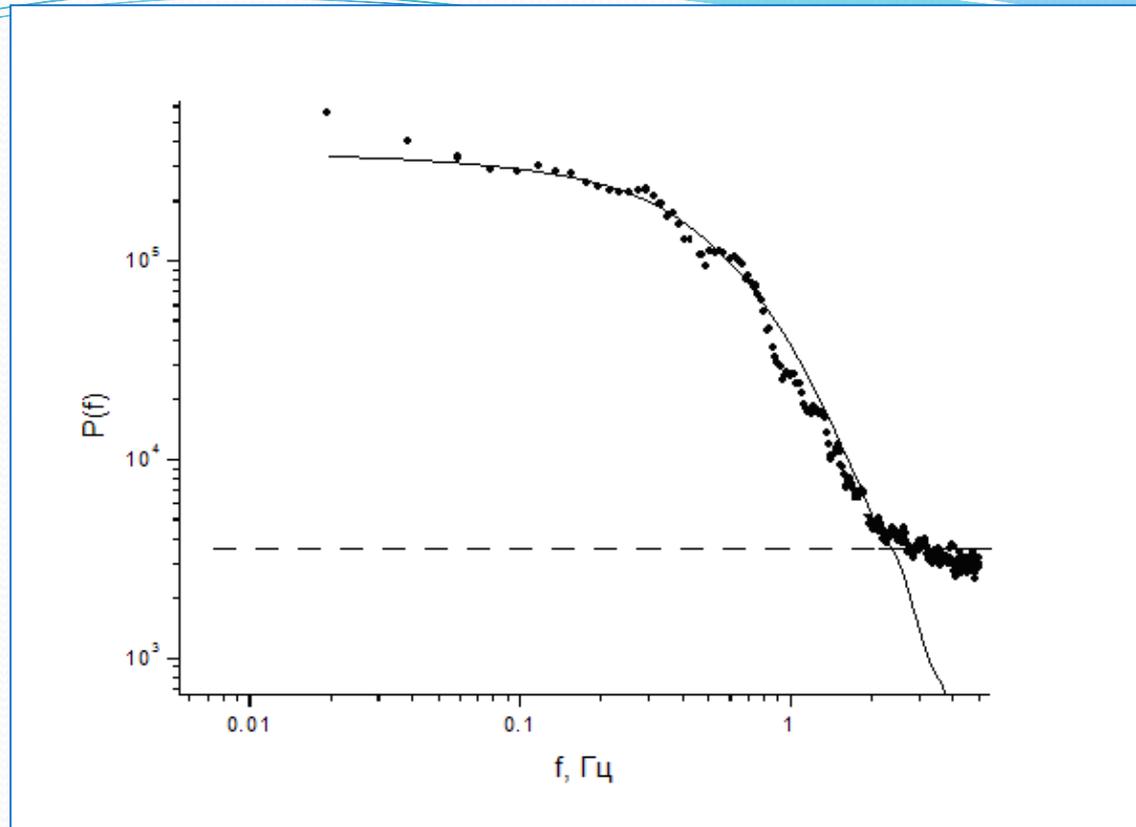
2) уровень турбулентности плотности зависит от гелиоцентрического расстояния r по степенному закону $C \sim r^{-4}$, $C = C_0 \left(\frac{1AU}{r}\right)^4$;

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 θ_0 - радиус источника по уровню $\frac{1}{\sqrt{e}}$.



- Теоретические спектры мерцаний для источников разных угловых размеров ($n = 3.6, v = 400$ км/с). Совместный результат диссертанта из работы [Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. и др. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазара 3С 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.].



- Пример спектра мощности источника 3С 48 (точки) и вписанный теоретический спектр мощности (сплошная линия). Уровень шумов указан штриховой линией. Совместный результат диссертанта из работы [Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. и др. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазара 3С 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.].

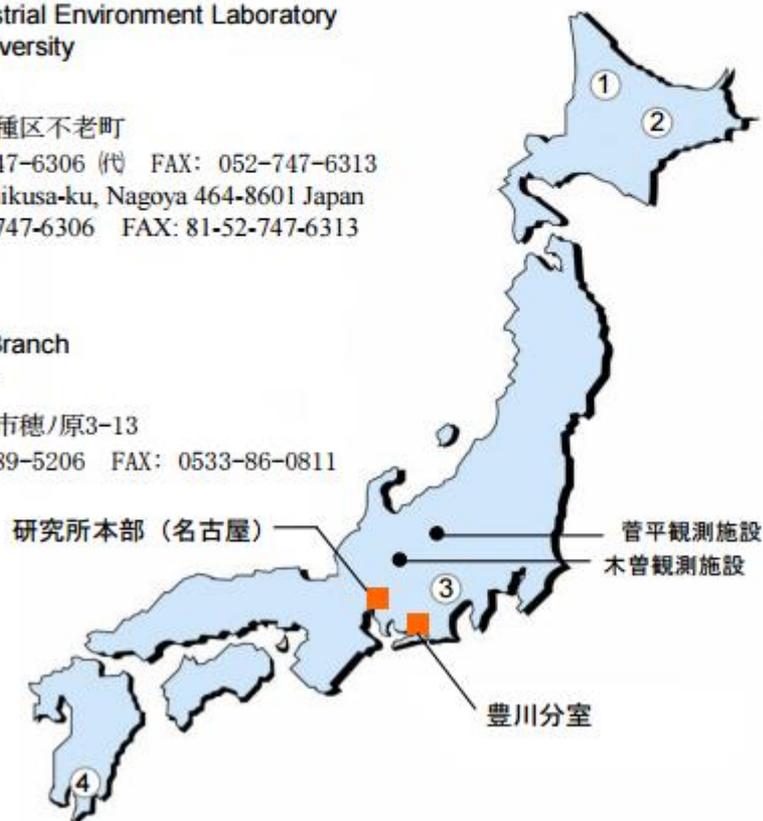
所在地 Locations

名古屋大学太陽地球環境研究所
附属ジオスペース研究センター
Geospace Research Center
Solar-Terrestrial Environment Laboratory
Nagoya University

〒464-8601
名古屋市千種区不老町
TEL: 052-747-6306 (代) FAX: 052-747-6313
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601 Japan
TEL: 81-52-747-6306 FAX: 81-52-747-6313

豊川分室
Toyokawa Branch

〒442-8507
愛知県豊川市穂/原3-13
TEL: 0533-89-5206 FAX: 0533-86-0811

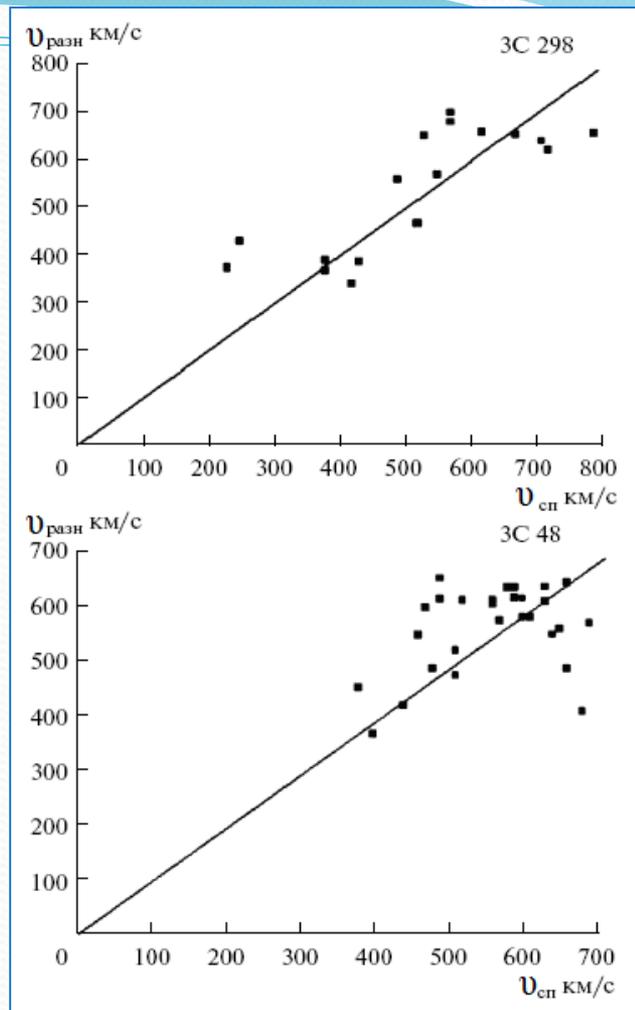


① 母子里観測所 Moshiri Observatory
〒074-0741
北海道雨竜郡幌加内町字母子里北西3
TEL: 0165-38-2345 FAX: 0165-38-2412

② 陸別観測所 Rikubetsu Observatory
〒089-4301
北海道足寄郡陸別町字遠別
TEL: 0156-27-8103 FAX: 0156-27-8103

③ 富士観測所 Fuji Observatory
〒401-0338
山梨県南都留郡富士河口湖町富士ヶ嶺1347-2
TEL: 0555-89-2148 FAX: 0555-89-2829

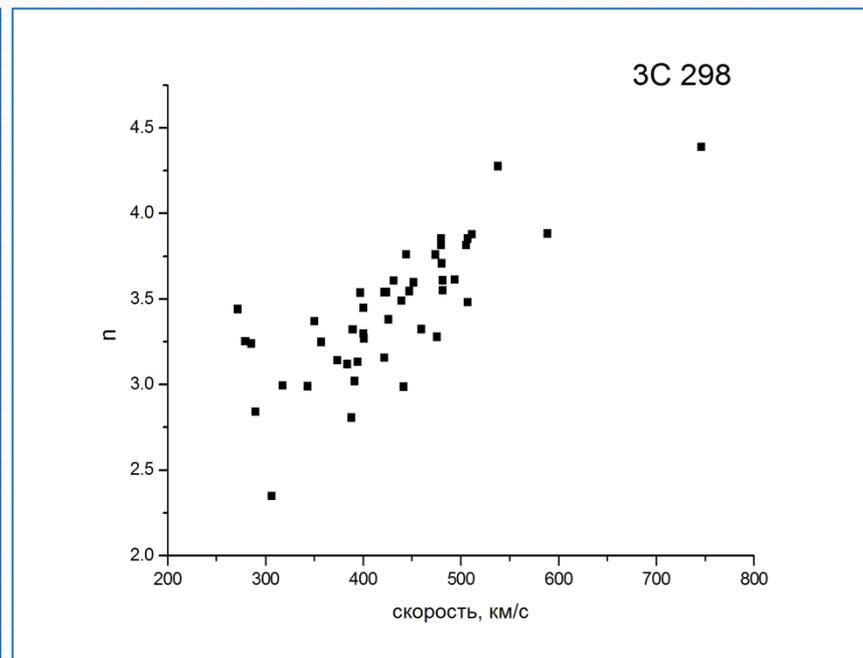
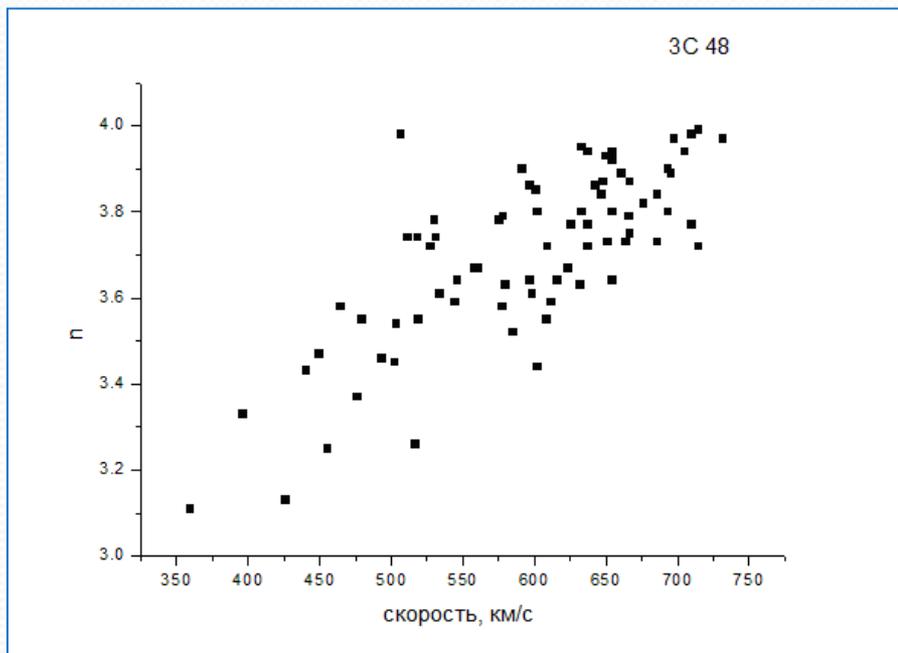
④ 鹿児島観測所 Kagoshima Observatory
〒891-2112
鹿児島県垂水市本城字下本城3860-1
TEL: 0994-32-0730 FAX: 0994-32-3066



- 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 [Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. и др. Межпланетные мерцания сильных радиисточников на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности / С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. - 2011. - Т. 51. - № 6. - С. 810-815.].
- **Результат вынесен на защиту**

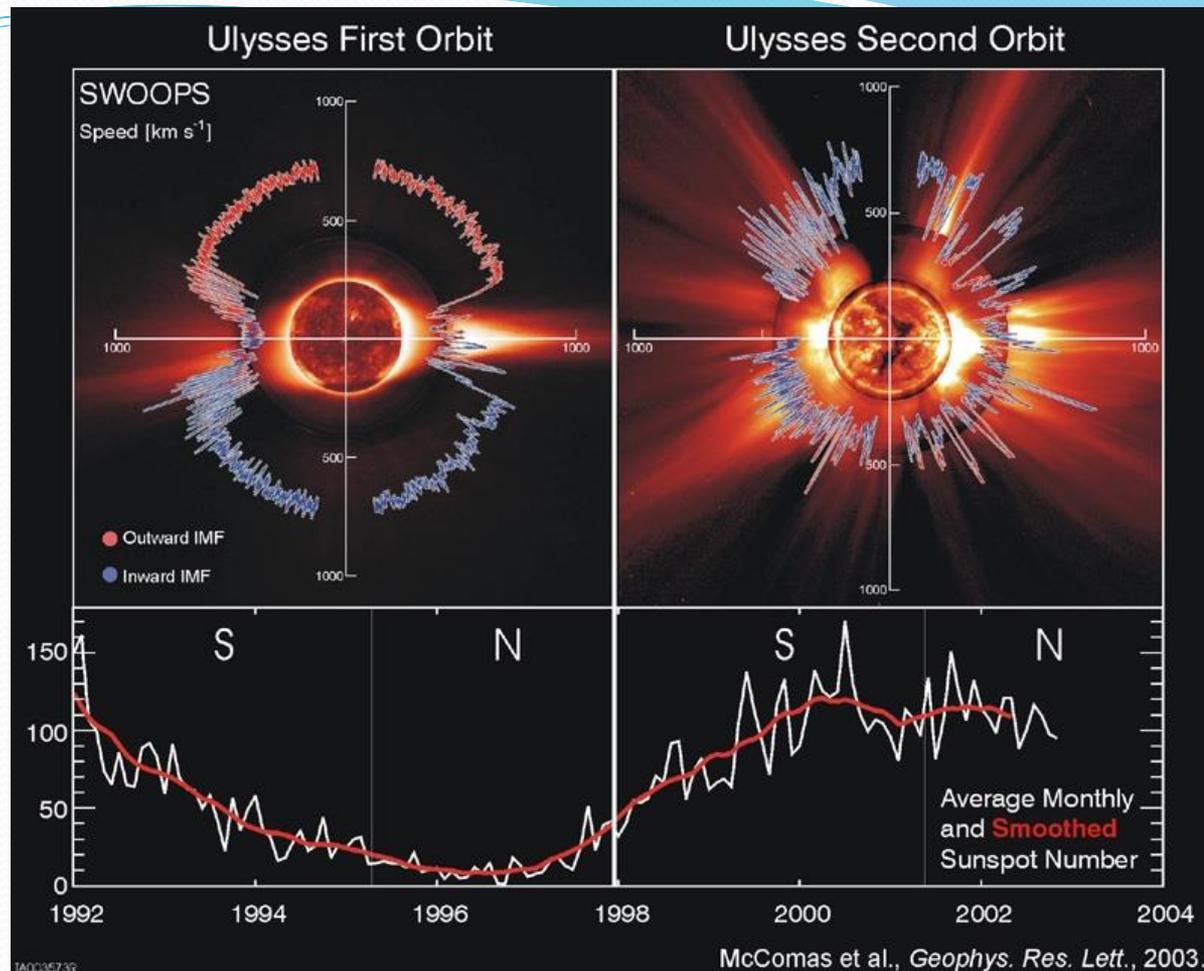
Минимум солнечной активности

- Представлены результаты наблюдений сильных мерцающих радиоисточников $^3\text{Co}48$ и $^3\text{C}298$ вблизи минимума солнечной активности 23 цикла (апрель-май 2007-2009 и ноябрь 2007-2009, соответственно). Состояние межпланетной плазмы было относительно спокойным.



Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от скорости солнечного ветра по наблюдениям источников 3C 48 и 3C 298. Совместный результат диссертанта из работ [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.; 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.].

● **Результат вынесен на защиту**



- 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. [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.].

Бимодальная структура солнечного ветра

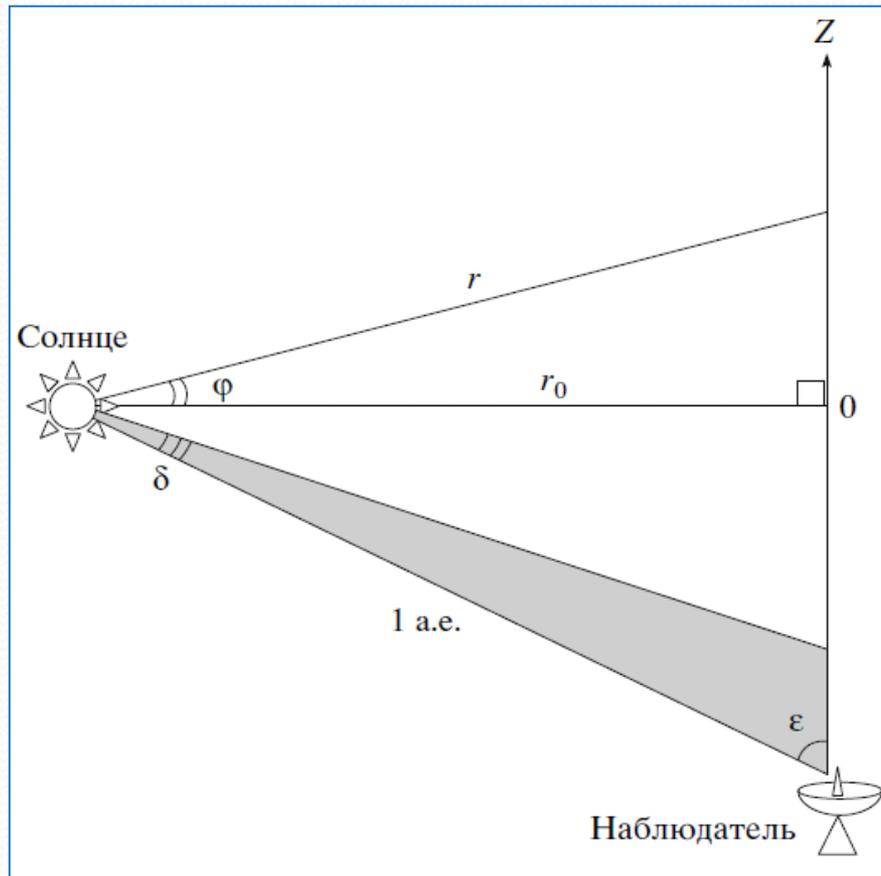
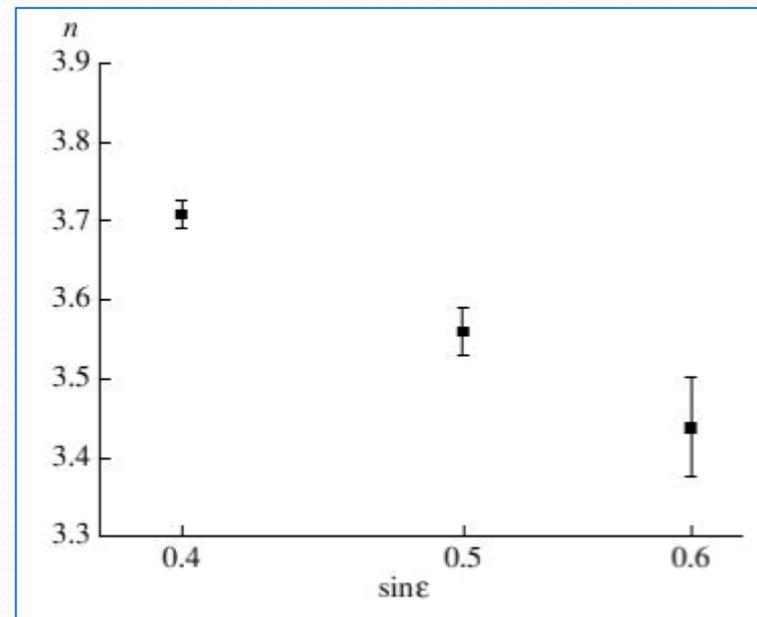
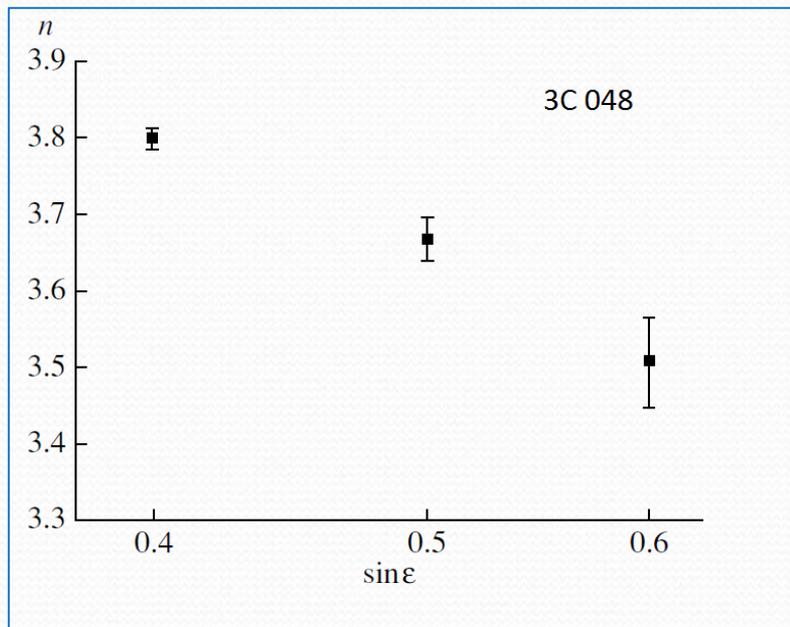


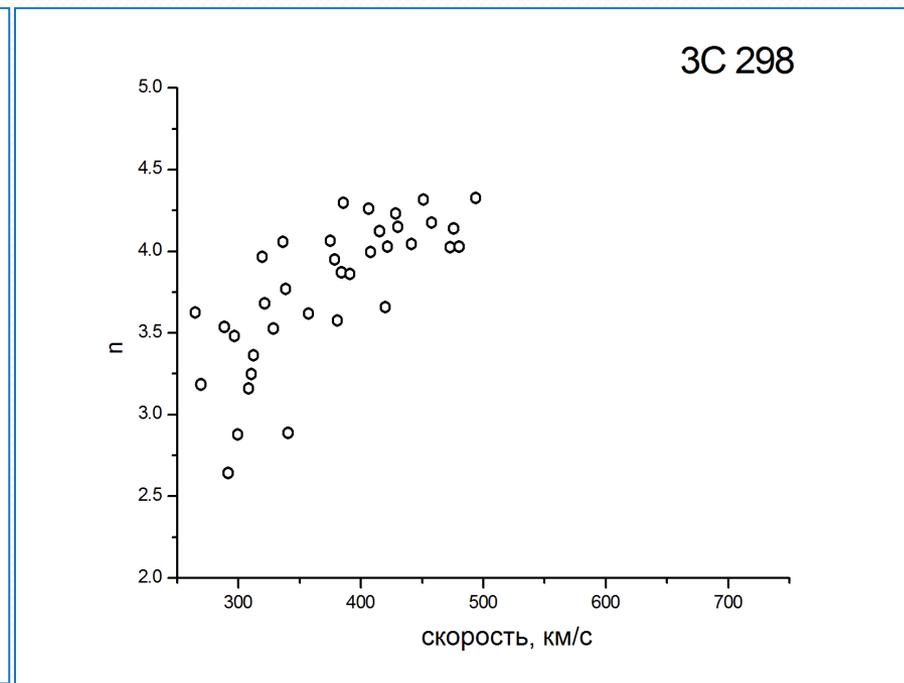
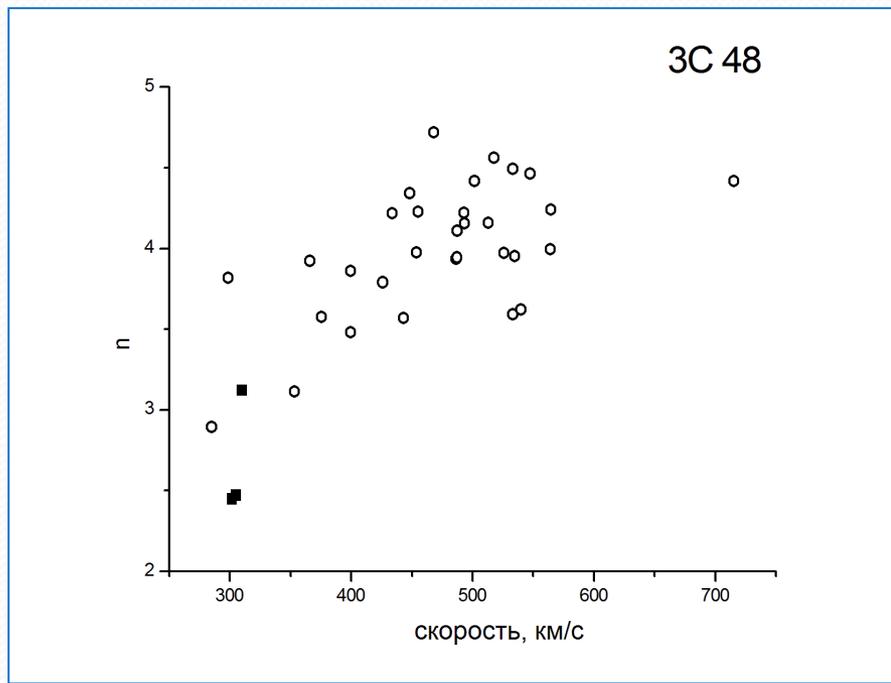
Иллюстрация наблюдений межпланетных мерцаний источника, находящегося в направлении OZ в условиях бимодальной структуры солнечного ветра (затенением выделена область медленного ветра). Совместный результат диссертанта из работы [Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. и др. Параметры турбулентности 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.].



Зависимость значений спектрального индекса турбулентности плазмы от элонгации для источника 3C 48. Исходные результаты представлены слева, а с учетом бимодальной структуры солнечного ветра – справа. По оси абсцисс логарифмический масштаб. Совместный результат диссертанта из работы [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.].

Максимум солнечной активности

- Представлены результаты наблюдений сильных мерцающих радиоисточников 3C048 и 3C298 вблизи максимума солнечной активности 24 цикла (апрель-май 2013 и сентябрь, ноябрь 2013, соответственно). По данным GOES зарегистрированы вспышки классов M и X.



Зависимости 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 [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.].

Результат вынесен на защиту

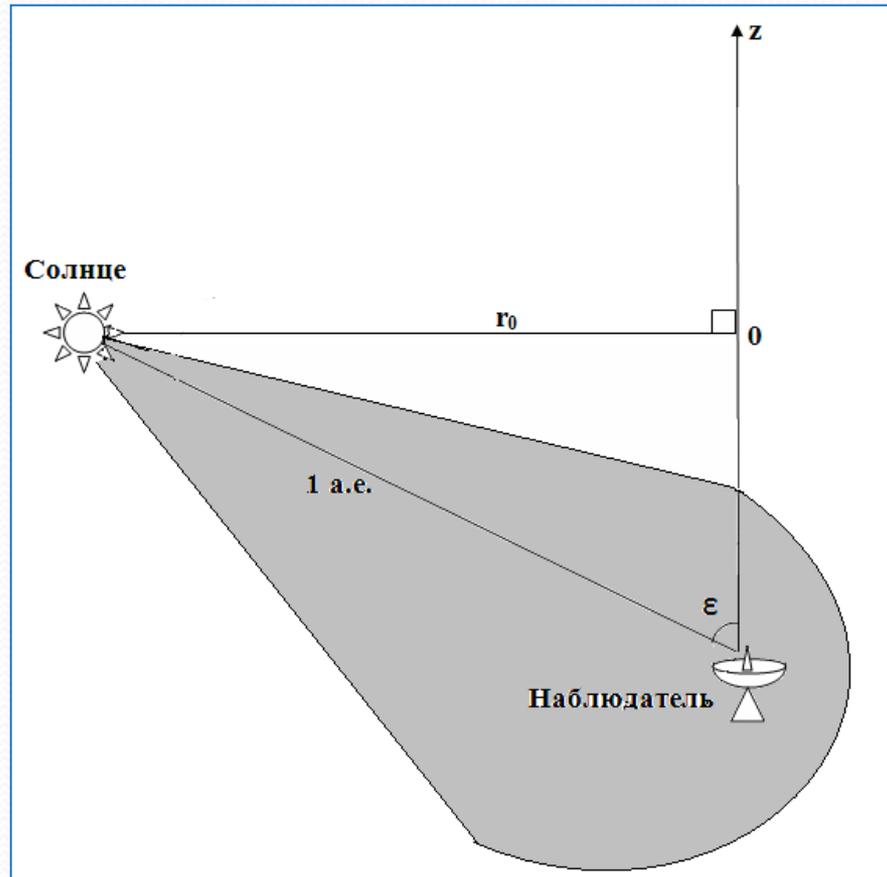
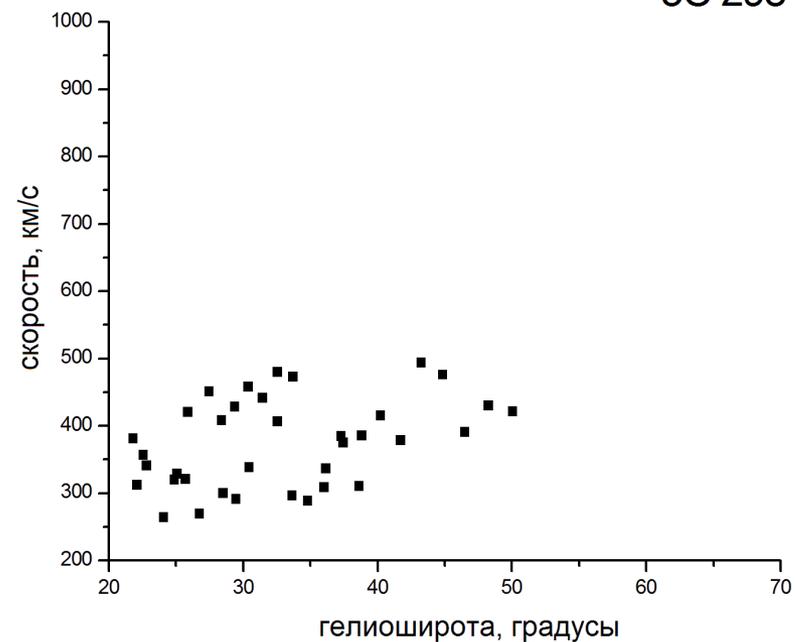


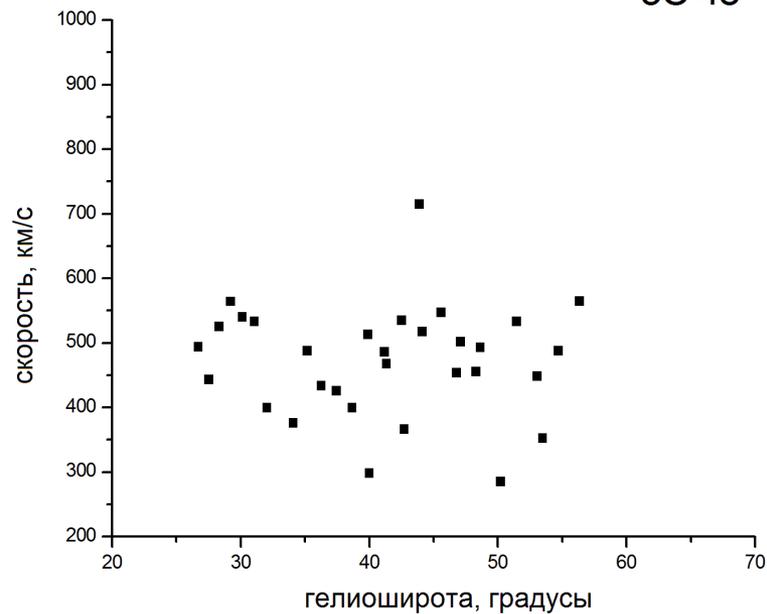
Схема прохождения выброса корональной массы мимо наблюдателя. Совместный результат

диссертанта из работы [Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. и др. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности / С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев [и др.] // *Астрономический журнал*. - 2015. - Т. 92. - №1. - С. 38-45.].

3C 298



3C 48



- 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 [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.].

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). 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.

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.

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 [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.], полученными на других частотах и в других циклах солнечной активности.

Участие в конференциях

- 1) II Пулковская молодежная астрономическая конференция – 2009 (ГАО, Пулково, 2009)
- 2) 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Украина, Киев, 2012)
- 3) XLII Young European Radio Astronomers Conference (ПРАО АКЦ ФИАН, Пушино, 2012)
- 4) Физика плазмы в Солнечной системе (восьмая) (АКЦ, Москва, 2013)
- 5) Научная сессия АКЦ ФИАН (ПРАО АКЦ ФИАН, Пушино, 2013)
- 6) 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Украина, Киев, 2013)
- 7) Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ГАО, Санкт-Петербург, 2013)
- 8) 43rd Young European Radio Astronomers Conference (Германия, Билефельд, 2013)
- 9) V Пулковская молодёжная конференция - 2014 (ГАО, Пулково, 2014)

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 аэронавигация. - 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.**, Глянцев 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. Глянцев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов // Астрономический журнал. - 2015. - Т. 92. - №1. - С. 38-45.
- **Glubokova S. K.**, Glyantsev A. V., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V., Shishov V. I. Parameters of the turbulence of the interplanetary plasma derived from scintillation observations of the quasars 3C 48 and 3C 298 at the solar-activity maximum / S. K. Glubokova, A. V. Glyantsev, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, V. I. Shishov // Astronomy Reports. - 2015. - V. 59. - №1. - P 33-39.

Рецензируемые статьи автора по теме диссертации:

- 5) **Glubokova S. K.**, Chashei I. V., Tyul'bashev S. A. Small-scale solar wind density turbulence spectrum from interplanetary scintillation observations / S. K. Glubokova, I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev // *Advances in Astronomy and Space Physics*. - 2012. - V. 2. - P. 164-166.
- 6) **Glubokova S. K.**, Chashei I. V., Tyul'bashev S. A., Shishov V. I. Changes in the spectral index of the interplanetary plasma turbulence in the period of low solar activity from observations of strongly scintillating source 3C 298 / S. K. Glubokova, I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov // *Advances in Astronomy and Space Physics*. - 2013. - V. 3. - P. 94-97.

Остальные статьи автора по теме диссертации:

- 7) **Глубокова С. К.**, Тюльбашев С. А., Чашей И. В. Шишов В. И. Результаты наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточника 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/>

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».

Благодарности

- 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.** - за полезные замечания
- **Тюльбашеву С.А.** – за помощь в разработке методики обработки наблюдений, за обсуждение результатов и поддержку
- **Глянцеву А. В.** - за совместную работу.



Спасибо за внимание!