

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

На правах рукописи
УДК 523.62-726+ 524.7-77

Глянцев Анатолий Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОИСТОЧНИКОВ И
КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО
НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ ВБЛИЗИ
МИНИМУМА И В ФАЗЕ РОСТА 23/24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ
АКТИВНОСТИ

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук

Москва — 2016

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук **Чашей Игорь Владимирович**.

Официальные оппоненты:

Писанко Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, Институт прикладной геофизики, Росгидромет, г. Москва / Зав. лабораторией магнитосферы ИПГ Росгидромета.

Ермолаев Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, Институт космических исследований РАН, г. Москва / Зав. лабораторией солнечного ветра ИКИ РАН.

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

Защита состоится «18» мая 2016 года в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН <http://asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «___» апреля 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В физике солнечного ветра на сегодняшний день остается целый ряд нерешенных вопросов. Нет теоретической модели, описывающей его бимодальную структуру и ее эволюцию в цикле солнечной активности, природу турбулентности солнечного ветра, динамику выбросов корональной массы и т.д. С другой стороны, экспериментальных данных часто недостаточно, чтобы сделать выбор между несколькими существующими моделями. Не построена полная картина токов и магнитных полей в гелиосфере. Неизвестно, наблюдается ли звездный ветер у всех звезд солнечного класса, или может наблюдаться аккреция. В этих условиях актуально изучение солнечного ветра и происходящих в нем процессов всеми имеющимися средствами. Наблюдения мерцаний радиоисточников на межпланетной плазме занимают важное место в ряду других методов исследования. В частности, они позволяют обнаруживать выбросы корональной массы на расстояниях от Солнца, недоступных для наблюдения с помощью коронографов, и исследовать структуру солнечного ветра сразу во многих направлениях, что недоступно при локальных измерениях. Кроме того, наблюдения мерцаний позволяют получать информацию об угловых размерах радиоисточников. В метровом диапазоне волн для многих источников такая информация отсутствует. Таким образом, рассматриваемая в диссертации проблема является актуальной.

Цели и задачи исследования

Основной целью является исследование радиоисточников и крупномасштабной структуры солнечного ветра по наблюдениям

межпланетных мерцаний вблизи минимума и в фазе роста 23/24 цикла солнечной активности.

Научная новизна

Для периода вблизи минимума солнечной активности обнаружено ослабление радиальных зависимостей индексов мерцаний для статистического ансамбля из нескольких сотен слабых мерцающих радиоисточников. Это ослабление интерпретировано как влияние гелиосферного токового слоя. Впервые применен метод оценки углового размера мерцающего компонента космического радиоисточника, основанный на измерениях частоты излома в дифракционной части спектра мощности насыщенных мерцаний. Такая оценка, проведенная для источника B0531+194, хорошо согласуется с данными, полученными на других частотах. Рассмотрена корреляция всплесков рентгеновского излучения Солнца, всплесков мерцаний космических радиоисточников на межпланетной плазме и возмущений геомагнитного поля в годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. Показано, что, если за вспышкой на Солнце следует возмущение магнитного поля Земли, то в подавляющем большинстве случаев наблюдаются заметные повышения уровня мерцаний. Это означает, что метод мерцаний позволяет отследить большую часть крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме. Оценены скорости возмущений. Показано, что полученные оценки в большинстве случаев близки к средней скорости возмущения между Солнцем и Землей.

Методология и методы

В работе использованы современные радиоастрономические методы. Применялись известные методы обработки данных, математической статистики и т.д. Основная доля расчетов выполнялась автоматически

компьютерными программами, написанными специально для этого. Дополнительный контроль качества наблюдений осуществлялся визуально по построенным графикам зависимости принятой плотности потока от времени. Полученные результаты анализировались с учетом самых свежих публикаций других авторов.

Достоверность результатов

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

Практическая значимость работы

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

отметить, что СМЕ представляют радиационную опасность для экипажей пилотируемых космических кораблей.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Для периода вблизи минимума солнечной активности обнаружено ослабление радиальной зависимости уровня мерцаний статистического ансамбля из нескольких сотен слабых мерцающих радиоисточников. Это ослабление интерпретировано как влияние гелиосферного токового слоя.
2. Впервые применен метод оценки углового размера мерцающего компонента космического радиоисточника, основанный на измерениях частоты излома в дифракционной части спектра мощности насыщенных мерцаний. Такая оценка, проведенная для источника В0531+194, хорошо согласуется с известными из литературы данными об угловом размере источника на других частотах.
3. Рассмотрена корреляция всплесков рентгеновского излучения Солнца, всплесков мерцаний космических радиоисточников на межпланетной плазме и возмущений геомагнитного поля в годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. Показано, что, если за вспышкой на Солнце следует возмущение магнитного поля Земли, то в 75% случаев после вспышки, но до геомагнитного возмущения, наблюдается повышение уровня мерцаний в 1.5 раза и выше. Это означает, что метод мерцаний позволяет отследить большую часть крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме.
4. Оценены скорости обнаруженных возмущений, достигших Земли. В двух третях случаев оценка скорости, полученная по наблюдениям мерцаний, отличается от средней скорости возмущения между Солнцем и Землей не более чем на 16%. Это показывает, что наблюдения мерцаний позволяют оценивать скорость возмущений и время их прихода к Земле.

Личный вклад диссертанта

Во всех результатах, выносимых на защиту, вклад соискателя является определяющим. Соискатель совместно с соавторами участвовал в постановке задач и формулировке выводов работы. Выделение вклада мерцающих источников из предварительно обработанного сигнала, оценка индекса мерцаний, детектирование всплесков мерцаний, оценка скоростей выбросов корональной массы и т.д. выполнены компьютерными программами, написанными на языке C# лично соискателем. Визуальный контроль качества наблюдений осуществлен лично соискателем. Метод оценки углового размера источника по наблюдениям насыщенных мерцаний предложен соискателем совместно с научным руководителем, расчеты по оценке этим методом углового размера источника В0531+194 проведены лично соискателем.

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

Все рисунки выполнены лично соискателем.

Данные о всплесках мерцаний, приведенные в таблицах 1, 2 и на рисунке 14, а также использованные для оценок скоростей СМЕ, приведенных в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, получены лично соискателем. Данные о вспышках на Солнце, приведенные в таблицах 1, 2 и на рисунке 14, а также использованные для оценок скоростей СМЕ, приведенных в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, заимствованы из источника [142]. Данные о геомагнитной активности, приведенные в таблицах 1, 2 и на рисунке 14, а также использованные для оценок скоростей СМЕ, приведенных в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, заимствованы из источника [141]. Оценки скоростей СМЕ по этим данным, приведенные в таблице 2 и на рисунках 17 – 18, получены лично соискателем. Рисунки 1 –11, 13 и 16 выполнены по данным, полученным лично соискателем. Рисунок 12

выполнен по данным по данным базы данных NED [150] и неопубликованным наблюдениям VLA [143]. Рисунок 15 представляет собой элементарную геометрическую схему, иллюстрирующую взаимное расположение Земли, Солнца и радиоисточника, и не имеет научной новизны.

Список публикаций диссертанта

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Апробация работы

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

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

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

Структура и объем диссертации

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

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** кратко рассмотрена история исследований солнечного ветра и основные результаты, полученные к настоящему времени. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, отражены примененные методы, показана научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, приведен список публикаций диссертанта, отражен его личный вклад и апробация полученных результатов.

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

Глава 2 посвящена наблюдениям мерцаний статистического ансамбля радиоисточников в 2007-2011 гг. В качестве ансамбля радиоисточников естественно взять участок неба фиксированной площади. Была выбрана площадь 64 квадратных градуса. Из исходного сигнала радиотелескопа с помощью медианного, разностного и диаграммного фильтров выделяется величина $\Delta = \lg\left(1 + \frac{\sigma_{IPS}^2}{\sigma_{noise}^2}\right)$, где σ_{IPS}^2 – дисперсия межпланетных мерцаний, σ_{noise}^2 – дисперсия шумов [5]. Величина Δ пропорциональна числу источников в площадке, имеющих дисперсию мерцаний, сравнимую с дисперсией шумов [5]. Характеризующая площадку величина Ψ есть сумма

всех значений Δ в площадке, превышающих некоторый пороговый уровень. Величина Ψ имеет смысл интегральной дисперсии мерцающего потока в данной площадке. За сутки радиотелескоп БСА ФИАН с 16-лучевой диаграммой направленности наблюдал 45 стандартных площадок. Была построена зависимость $\Psi = \Psi(t)$, где одна точка по оси времени равна времени наблюдения одной площадки. Зависимость, для каждого года усредненная по месяцу (февраль соответствующего года) приведена на рисунке 1.

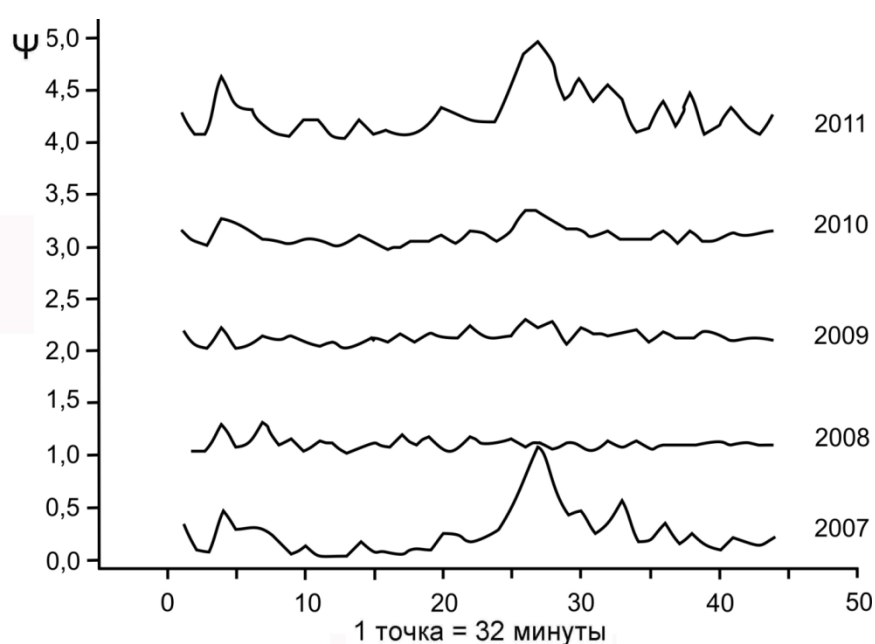


Рисунок 1. Интегральная дисперсия мерцающего потока в относительных единицах в зависимости от времени суток. Минимальное расстояние площадки от Солнца в точке 28. Результаты диссертанта из работы [6].

В модели сферически симметричной среды основной вклад в мерцания вносит прицельная точка, поэтому естественно ожидать, что зависимость $\Psi = \Psi(t)$ будет иметь выраженный максимум в ближайшей к Солнцу площадке. Это действительно имеет место в 2007 и 2011 гг., но зависимость

исчезает в 2008-2010 гг. Сходную картину демонстрируют и наблюдения в летние месяцы. Этот результат можно интерпретировать как влияние гелиосферного токового слоя с сильно повышенным по сравнению с окружающей плазмой абсолютным уровнем турбулентности. Присутствие такого слоя приводит к тому, что в минимуме солнечной активности существенный или даже определяющий вклад в модуляцию радиоволн на всех наблюдаемых элонгациях вносят низкоширотные, примыкающие к орбите Земли области солнечного ветра. Эти области просвечиваются при наблюдении всех площадок, и поэтому их вклад ослабляет зависимость $\Psi = \Psi(t)$. Отметим, что минимум 23/24 цикла солнечной активности оказался аномально глубоким: индексы солнечной активности в 2008–2009 гг. были самыми низкими за последние 75 лет [7].

В **Главе 3** излагается впервые применяемый метод оценки углового размера мерцающего радиоисточника по наблюдениям насыщенных мерцаний. В режиме насыщенных мерцаний частота излома спектра мощности мерцаний связана со скоростью солнечного ветра и угловым размером источника формулой $f_{кр} = \frac{v}{2\pi z_0 \theta_0}$. Здесь $f_{кр}$ – частота излома спектра, v – скорость солнечного ветра, z_0 – расстояние до прицельной точки, θ_0 – угловой размер мерцающего источника. Угловой размер мерцающего компонента источника В0531+194 оценивался по этой формуле для 8 дней наиболее качественных наблюдений в режиме насыщенных мерцаний в июне 2011 г. Среднее значение углового размера составило $0.24''$, среднеквадратичное отклонение – $0.05''$. Эта оценка хорошо согласуется с данными интерферометрических наблюдений на высоких частотах [4 – 5, 8 – 12].

Глава 4 посвящена детектированию выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний в 2011-2012 гг. Данные о всплесках мерцаний сопоставлены с данными о геомагнитных возмущениях и рентгеновских вспышках на Солнце. Принималось, что в данный день произошло

заслуживающее внимания событие, при соблюдении любого из трех следующих условий: а) рентгеновская вспышка класса M5.0 или выше; б) возрастание индекса мерцаний в 1.5 и более раза по сравнению с предыдущим днем не менее чем у пяти радиоисточников; в) падение индекса Dst ниже -50 нТ. Если значимое событие обнаруживалось по критерию Dst или мерцаний, при поиске связанных с ним рентгеновских вспышек просматривались вспышки класса M1.0 и выше. Если значимое событие обнаруживалось по критерию рентгеновских вспышек или мерцаний, при поиске связанных с ним падений Dst учитывались падения от -20 нТ и ниже. Результаты приведены на рисунке 2. Подпись «sc» («scintillation») означает, что наблюдался всплеск мерцаний радиоисточников, «X» («X-ray») – что наблюдалась вспышка в рентгеновском диапазоне, «Dst» – что наблюдалось падение геомагнитного индекса Dst. Событие может быть зафиксировано надежно или не надежно. ненадежное детектирование события может быть связано с техническими проблемами радиотелескопа или внешними помехами. В этом случае мы не можем знать достоверно, имел ли место всплеск мерцаний, поэтому событие трудно классифицировать.

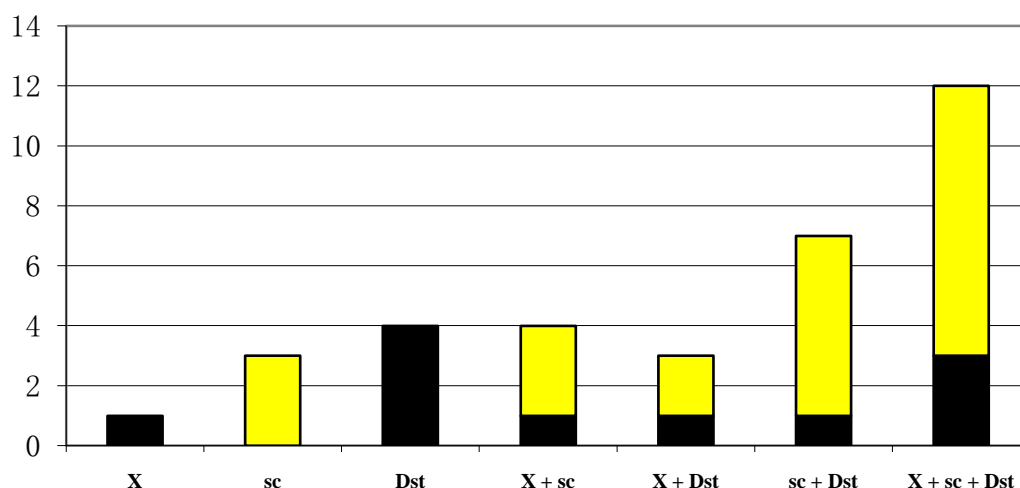


Рисунок 2. События, обнаруженные с июля 2011 г. по июнь 2012 г. По вертикальной оси отмечено количество событий того или иного типа. По горизонтальной оси дан тип события. Светлым цветом отмечены надежно зафиксированные события, черным цветом – ненадежно зафиксированные. Данные о рентгеновских вспышках заимствованы из источника [1]. Данные о геомагнитной активности заимствованы из источника [2]. Данные о всплесках мерцаний получены диссертантом и опубликованы в работе [13].

Легко видеть, что надежно зафиксировано двенадцать случаев, когда за вспышкой в рентгеновском диапазоне следовал всплеск мерцаний, и только два случая, когда за вспышкой в рентгеновском диапазоне следовало падение Dst (что говорит о наличии возмущения), но не следовал всплеск мерцаний. Тем самым показано, что примененный метод позволяет регистрировать подавляющую часть распространяющихся возмущений, связанных со вспышками класса M5.0 и выше.

В **Главе 5** приведены оценки скорости возмущений, с которыми связаны одновременно и рентгеновская вспышка, и всплеск мерцаний, и геомагнитное возмущение. Оценка производилась по промежутку времени между рентгеновской вспышкой и всплеском мерцаний. Если в наблюдениях проявляется всплеск мерцаний, вызванный СМЕ, значит, на момент

наблюдения источника возмущение достигло луча зрения на источник. Минимальное расстояние, которое оно должно было для этого пройти, равно $1a.e.\sin \varepsilon$, где ε – элонгация источника. Поэтому скорость СМЕ можно оценить снизу как

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

Здесь V – средняя скорость возмущения между короной и лучом зрения, V_{x-sc} («X-ray – scintillations») – нижняя оценка скорости возмущения, ε – элонгация источника, показавшего всплеск мерцаний, t – промежуток времени между рождением СМЕ и кульминацией источника. За момент рождения СМЕ принимался момент кульминации вспышки в рентгеновском диапазоне [1], за момент прихода СМЕ на Землю – момент минимума резкого уменьшения геомагнитного индекса Dst [2].

Если всплеску мерцаний и падению Dst предшествовало несколько вспышек, возникает вопрос, какая из вспышек связана с рождением СМЕ. Здесь использовались два критерия. Во-первых, предполагалось, что средняя скорость СМЕ не должна быть меньше 400 км/с (характерная скорость медленного солнечного ветра) и больше 2500 км/с (экстремально высокая скорость для СМЕ [14]). Во-вторых, учитывался поток рентгеновского излучения. Из всех вспышек, подходящих по первому критерию, выбиралась вспышка с наибольшим рентгеновским потоком, а также все вспышки, рентгеновский поток которых составил не менее 30% от этого максимального. Для каждого исследованного возмущения определялся набор вспышек, которыми могло быть порождено это возмущение, и для каждой вспышки из этого набора делалась оценка скорости. Кроме того, по промежутку времени между рентгеновской вспышкой и падением Dst оценивалась средняя скорость возмущения между Солнцем и Землей. Полученные оценки приведены на рисунке 3.

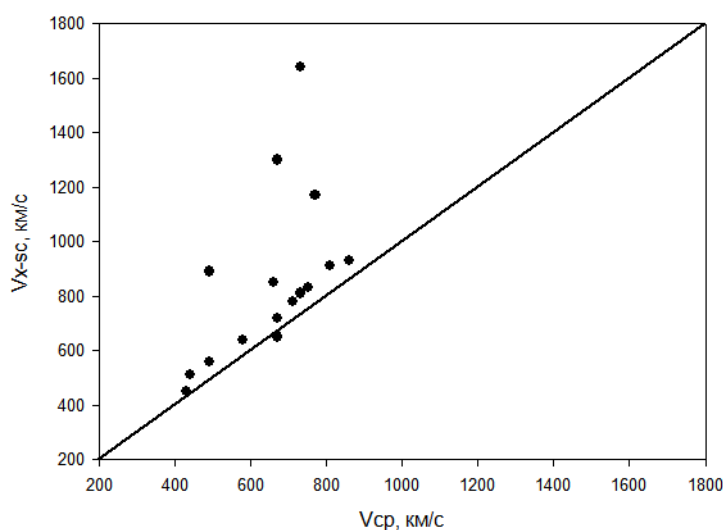


Рисунок 3. Сравнение оценки V_{x-sc} со средней скоростью возмущения V_{cp} для девяти событий в 2011-2012 гг. Данные о вспышках на Солнце, использованные для расчета V_{x-sc} и V_{cp} , заимствованы из источника [1], данные о геомагнитной активности – из источника [2]. Данные о всплесках мерцаний и оценки скорости получены диссертантом и опубликованы в работе [15].

Видно, что в большинстве случаев оценки, основанные на наблюдениях мерцаний, хорошо согласуются со средней скоростью возмущения между Землей и Солнцем.

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

Заключение

Диссертационная работа посвящена исследованию радиоисточников и крупномасштабной структуры солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний вблизи минимума и в фазе роста 23/24 цикла

солнечной активности. В работе использованы наблюдения, выполненные в 2007-2012 гг. на радиотелескопе БСА Пушчинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН.

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

По наблюдениям 2011 г. впервые апробирован метод оценки углового размера просвечивающего источника по наблюдениям насыщенных мерцаний. Для источника В0531+194 получена оценка углового размера в $0.24'' \pm 0.05''$, что хорошо согласуется с известными из литературы оценками углового размера этого источника на высоких частотах.

В годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. по всплескам мерцаний детектировались выбросы корональной массы. Полученные данные сопоставлялись с информацией о рентгеновских вспышках на Солнце и геомагнитных возмущениях. Показано, что метод мерцаний позволяет детектировать подавляющую часть выбросов, связанных с рентгеновскими вспышками класса М5.0 и выше.

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

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

Список литературы

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

2. Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, URL: <http://www.stelab.nagoyau.ac.jp>.
3. NASA/IPAC Extragalactic Database, URL: <http://ned.ipac.caltech.edu/>
4. NRAO VLA Archive Survey Images Page, URL: <http://www.aoc.nrao.edu/>
5. Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Субаев И. А., Чашей И. В. Наблюдения межпланетных и ионосферных мерцаний ансамбля радиоисточников в режиме мониторинга // *Астрономический вестник*. – 2008. – Т.42. – С. 363 – 372.
6. Чашей И. В., Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Глянцев А. В., Субаев И. А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности // *Космические исследования*. – 2013. – Т. 51. С. 28 – 34.
7. Gibson S. E., Kozyra J. U., de Toma G. et al. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – V. 114. – P. 9105.
8. Perley R. A. The positions, structures, and polarizations of 404 compact radio sources // *The Astronomical Journal*. . – 1982. – V. 87. – P. 859. – 880.
9. Jeyakumar S., Saikia D. J., Pramesh Rao A., Balasubramanian V. Small-scale structures in compact steep-spectrum and GHz-peaked-spectrum radio sources. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2000. . – V. 362. – P.27 – 41.
10. Fomalont E. B., Petrov L., MacMillan D. S. et al. The Second VLBA Calibrator Survey: VCS2 // *The Astronomical Journal*. – 2003. – V. 126. – P. 2562. – 2566.
11. Wehrle A. E., Morabito D. D., Preston R. A. Very Long Baseline Interferometry observations of 257 extragalactic radio sources in the ecliptic region // *Astronomical Journal*. – 1984. – V. 89. – P. 336 – 341.
12. Petrov L., Hirota T., Honma M. et al. VERA 22 GHz Fringe Search Survey // *The Astronomical Journal*. – 2007. – V. 133. – P. 2487 – 2494.

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

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

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