

---

---

## РАДИОТЕЛЕСКОП ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

### RADIO TELESCOPE FOR MONITORING THE STATE OF INTERPLANETARY PLASMA

---

---

**В.В. Орешко**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Астрокосмический центр,  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,  
Пушино, Россия, oreshko@prao.ru

**С.А. Тюльбашев**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Астрокосмический центр,  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,  
Пушино, Россия, serg@prao.ru

**V.V. Oreshko**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Astro Space Center,  
Pushchino Radio Astronomy Observatory,  
Pushchino, Russia, oreshko@prao.ru

**S.A. Tyul'bashev**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Astro Space Center,  
Pushchino Radio Astronomy Observatory,  
Pushchino, Russia, serg@prao.ru

---

---

**Аннотация.** Рассмотрены научные и технические требования к специализированному радиотелескопу, позволяющему осуществлять краткосрочный прогноз космической погоды по наблюдениям мерцающих на движущихся неоднородностях межпланетной плазмы радиосточников. Показано, что, помимо прогнозирования, на радиотелескопе можно решать другие научные задачи. Предложен вариант технической реализации антенны, рассмотрена структура радиотелескопа. Радиотелескоп является разнесенной антенной решеткой, состоящей из модулей, в каждом из которых 16 (4×4) базовых антенных элементов, представляющих собой два ортогональных диполя. Эффективная площадь модуля составляет 16 м<sup>2</sup> на центральной частоте 180 МГц, общая полоса рабочих частот 120–240 МГц. Поле зрения модуля в диапазоне углов ±50° от зенита будет на центральной частоте не менее 400 кв. град. при падении чувствительности на краях площадки в два раза. Показано, что телескоп, состоящий из 64 модулей, позволит делать прогноз не менее 2–3 раз в день. Оценка точности предсказания времени прихода выброса к Земле — один час.

**Ключевые слова:** космическая погода, межпланетные мерцания, прогноз, низкочастотные наблюдения, Большая синфазная антенна (БСА).

**Abstract.** This paper examines scientific and technical requirements for a specialized radio telescope which allows us to make a space weather forecast from observations of radio sources that scintillate on moving irregularities of interplanetary plasma. It is shown that in addition to forecasting the radio telescope can solve other scientific problems. A variant of the antenna's technical implementation is proposed, and the structure of the radio telescope is studied. The radio telescope is a spaced antenna array consisting of modules, each with 16 (4×4) base antenna elements representing 2 orthogonal dipoles. The effective area of a module is 16 m<sup>2</sup> at the central frequency of 180 MHz; the total operating frequency band is 120–240 MHz. The module's field of view is at least 400 sq.deg. in the range ± 50° from the zenith at the central frequency. The sensitivity drops by a factor of 2 at the edges of the field of view. It is demonstrated that the telescope consisting of 64 modules will provide a forecast at least 2–3 times a day. The estimated accuracy of predicting the arrival time of coronal mass ejection at Earth is one hour.

**Keywords:** space weather, interplanetary scintillation, forecast, low-frequency observations, Large Phased Array (LPA).

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Межпланетные мерцания компактных радиосточников были открыты Хьюишем в 1964 г. [Hewish et al., 1964]. Через два года по наблюдениям межпланетных мерцаний на разнесенных антеннах были получены оценки скорости солнечного ветра [Hewish et al., 1966]. В 1974 г. были обнаружены корональные выбросы массы (КВМ) [Gosling et al., 1974], а в 1976 г. измерены скорости их распространения [Gosling et al., 1976; Vlasov et al., 1979]. В 1979 г. были построены двумерные карты распре-

деления уровня межпланетных мерцаний, на которых было видно распространение КВМ от Солнца [Vlasov et al., 1979]. Очевидно, что вспышки на Солнце приводят к изменениям в солнечном ветре и геомагнитные бури вызываются приходом к Земле выбросов плазмы вспышечного происхождения (см., например, [Wagner, 1982]).

Поток заряженных частиц, идущих от Солнца, может вызывать разного рода геомагнитные эффекты: воздействовать на космические аппараты (КА), находящиеся на низких орбитах (нагрев атмосферы

приводит к увеличению ее размеров и КА испытывают торможение в атмосфере); влиять на распространение радиоволн (возбуждается ионосфера, что приводит к помехам); вызывать геоиндуцированные токи в длинных цепях (возможна перегрузка трансформаторов из-за отказа цепей электроснабжения) и т. д. (см., например, [Петрукович, 2008]). Приведенные примеры показывают важность прогноза космической погоды.

В мире функционируют несколько крупных центров, для которых прогнозирование геомагнитной активности является одной из основных задач. В России такие центры находятся, например, в ИЗМИРАН [<http://spaceweather.izmiran.ru/>], в ИПГ [<http://ipg.geospace.ru/space-weather-forecast.html>], в ИСЗФ [<https://iszf.irk.ru/megascience/>]. За рубежом можно отметить центры в NOAA (США) [[www.swpc.noaa.gov](http://www.swpc.noaa.gov)], WDC (Япония) [[wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)], ESA (Европа) [<https://swe.ssa.esa.int/>], CESSI (Индия) [<http://www.cessi.in/spaceweather/>], NSSC (Китай) [[http://www.spaceweather.org/ISES/rwc/rwc\\_cn\\_a.html](http://www.spaceweather.org/ISES/rwc/rwc_cn_a.html)].

Если рассмотреть деятельность этих центров, можно выделить общие детали в предсказаниях космической погоды. Долгосрочные, среднесрочные, краткосрочные прогнозы имеют различную наблюдательную основу. Например, мы наблюдаем мощную вспышку с последующим КВМ, связанную с крупным пятном или группой пятен на Солнце, следовательно, через оборот (27–28 дней) мы, возможно, вновь увидим вспышку. Предсказание вероятностное и связано с тем, что крупные пятна или группы пятен являются долгоживущими объектами и время их жизни больше, чем один оборот Солнца. Еще один тип геоэффективных крупномасштабных возмущений — ассоциированные с корональными дырами коротитирующие области взаимодействия разноразмерных потоков — также может быть предсказан по 27-дневной повторяемости. Так делается долгосрочный прогноз.

Если пятна наблюдаются на лимбе, в случае возникновения вспышки (предположение, основанное на статистике вспышек) можно ожидать, что через 8–12 дней мы почувствуем ее на Земле. Это среднесрочный прогноз.

Если мощные солнечные вспышки наблюдаются за день или два до прохождения или во время прохождения активной области через центральный меридиан, они могут привести к КВМ, который достигнет Земли. Исходя из наблюдений поверхности Солнца и его короны рассчитывают вероятную скорость распространения выброса и его мощность (см., например, [Millward et al., 2013; <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/WSA-Enlil-at-SWPC~3/>]). Так выглядит краткосрочный прогноз.

Картина, представленная выше, очень неполная и слегка утрированная. Главное в этой картине, что прогнозирование космической погоды, несмотря на ежедневные наблюдения Солнца и его короны в диапазоне от радио до рентгена, включает элемент непредсказуемости. Пятна могут не дать вспышки с последующим КВМ, они могут исчезнуть за солнечный оборот, могут дать вспышку за несколько

дней до или через несколько дней после прохождения через центральный меридиан, и поэтому Земля может остаться вне направления распространения выброса.

Очень высокую точность прогноза дают наблюдения на КА GOES, ACE, DSCOVR, Wind [<https://www.ncei.noaa.gov/>; <https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/dscovr-deep-space-climate-observatory>; <https://www.swpc.noaa.gov/products/ace-real-time-solar-wind>], находящихся в точке Лагранжа L1. Эта точка находится на линии Солнце—Земля на расстоянии 1.5 млн км от Земли. Приборы, установленные на КА GOES, Wind, ACE и других аппаратах, позволяют измерять направление магнитного поля, что принципиально важно для прогнозирования (т. е. после измерения становится ясно, произойдет ли пересоединение магнитных силовых линий и будет ли магнитная буря на Земле), а также определять скорость и концентрацию заряженных частиц, проходящих через КА. Скорость распространения КВМ может быть от нескольких сотен до тысяч километров в секунду. Легко оценить, что при скорости распространения 1000 км/с выброс достигнет Земли меньше чем через полчаса после прохождения через точку L1. С учетом времени реакции служб, запас времени для подготовки к приходу выброса к Земле практически отсутствует.

Таким образом, стандартный путь прогнозирования включает следующие шаги: наблюдаем за Солнцем и короной, отслеживаем вспышки; при наблюдении сильных вспышек в рентгеновском диапазоне классов M и X предположительно определяем начальную скорость заряженных частиц, величину магнитного поля, концентрацию частиц и рассчитываем ожидаемое время прихода выброса к Земле; на КА в точке L1 фиксируем реальный приход КВМ. То есть на первом шаге наблюдается Солнце и его корона, на следующем шаге — отслеживается приход выброса в точку L1 и определяются его параметры.

В этой схеме отсутствуют наблюдения выбросов между Солнцем и Землей, хотя уже больше 45 лет назад было показано, что с помощью метода межпланетных мерцаний можно измерять скорость распространения выброса на расстояниях от долей астрономической единицы и вплоть до орбиты Земли [Vlasov, 1979]. Выпадение из процедуры прогнозирования этапов регистрации выброса и оценки скорости его распространения на промежуточных расстояниях между Солнцем и Землей на первый взгляд кажется необъяснимым. Забегая вперед, скажем, что это связано с тем, что для наблюдений мерцающих радиоисточников нужно иметь радиотелескопы, обеспечивающие высокую чувствительность и возможность ежесуточных наблюдений в дневное время.

В основном метод межпланетных мерцаний используется для исследования вспышек постфактум (см., например, [Bisi et al., 2010] и ссылки там же). При обычном исследовании предполагается, что для каждого мерцающего источника есть зависимость индекса мерцаний от элонгации (угла между направлениями на источник и на Солнце при наблюдениях с Земли), построенная по более ранним наблюдениям радиоисточника. Тогда, наблюдая мерцающий источ-

ник сегодня, мы сравниваем его индекс мерцаний  $m$  со средним индексом мерцаний этого же источника  $m_{av}$ , полученным ранее для такой же элонгации. Этот так называемый  $g$ -индекс ( $g = m/m_{av}$ ) является основной при исследовании выбросов. Однако, как показано в работах [Chashei et al., 2019; Lukmanov et al., 2022], в усредненной за год, а также и по месяцам зависимости индекса мерцаний от элонгации каждый год наблюдаются сильные различия и для ежедневного прогнозирования эту зависимость использовать нельзя.

При прогнозировании по наблюдениям на Большой синфазной антенне Физического института им. П.Н. Лебедева (БСА ФИАН) было принято решение использовать индексы мерцаний за соседние даты [Shishov et al., 2016]. Текущий индекс мерцаний делится на индекс мерцаний за предыдущий день, и в случае резкого изменения индекса в 1.5 и более раза принимается решение о нахождении выброса на луче зрения. В качестве примера приведем фрагмент рисунка из работы [Shishov et al., 2016], где отчетливо прослеживается усиление мерцаний вокруг Солнца в виде кольцевой структуры (рис. 1). Часть этой структуры попадает на склонения ниже  $-9^\circ$ , т. е. в область, где нет лучей БСА. Мы нанесли на рисунок кольца. Расстояние между внутренним и внешним фронтом меньше  $30^\circ$  по элонгациям, или 0.3 а.е.

По наблюдениям мерцающих радиоисточников можно зарегистрировать выброс [Kojima et al., 1998; Manoharan et al., 2001; Shishov et al., 2016; Fallows et al., 2023; Morgan et al., 2023], оценить скорость его распространения разными способами (например, [Tokumaru et al., 2012; Glubokova et al., 2013; Mejia-Ambriz et al., 2015; Iwai et al., 2019]), увидеть симметричность или несимметричность распространения выброса относительно центрального меридиана, предсказать время прихода коротирующих структур к Земле [Tokumaru et al., 2010; Mejia-Ambriz et al., 2015; Romero-Hernandez et al., 2015]. Почти все вышеприведенные работы выполнялись на меридианных инструментах, где наблюдения мерцающих радиоисточников проводятся раз в сутки. При отсутствии наблюдений за следующие сутки прогноз сделать нельзя, поскольку сравниваются мерцания радиоисточников за два последовательных дня. Вторая проблема заключается в том, что для прогнозирования нужно наблюдать многие десятки, а лучше сотни компактных радиоисточников. Если инструмент имеет только одну диаграмму направленности (один луч), наблюдение сотни источников в день займет все дневное время радиотелескопа даже при его выдающейся чувствительности.

Единственный инструмент, на котором удалось реализовать регулярный прогноз космической погоды по наблюдениям межпланетных мерцаний, — это БСА ФИАН [Shishov et al., 2016]. Четырехлетний опыт прогнозирования [https://sw.prao.ru/] показывает, что меридианные инструменты имеют принципиальные ограничения, которые не позволяют сделать прогноз в ряде случаев. Например, для БСА (прием на длине волны 2.7 м) изменения мерцаний нужно наблюдать на элонгациях примерно  $25^\circ$ – $60^\circ$  (соответствует расстояниям 0.4–0.85 а.е.). При скорости

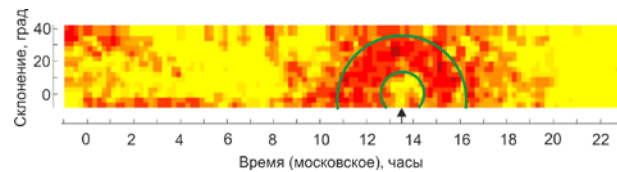


Рис. 1. Выброс, зарегистрированный 8 апреля 2014 г. Солнце находится внутри желтой зоны, отмеченной стрелкой на горизонтальной шкале. Вокруг Солнца виден фрагмент кольца, внутри которого наблюдается резкое (в два и более раза) повышение индекса мерцаний. Оттенки цвета от желтого до багрового показывают изменения индекса мерцаний источников между 7 и 8 апреля от 0.2 до более 1.5. Рисунок заимствован нами из работы [Shishov et al., 2016] и частично переделан

распространения 1500 км/с (быстрый КВМ) выброс преодолет эту зону за 12 ч. Если выброс приходится на ночное время, он будет пропущен.

Заметим также, что исследователи, использующие наблюдения мерцающих радиоисточников для исследования межпланетной плазмы и отдельных выбросов, предприняли попытку организовать неформальное сообщество наблюдателей, находящихся в Мексике, Индии, России, Японии, США, Австралии, Кореи и других странах [Bisi et al., 2017].

Помимо меридианных инструментов, тестовые наблюдения мерцающих радиоисточников и изменения мерцаний при прохождении выброса регистрировались на системе апертурного синтеза MWA (Murchison Widefield Array) [Waszewski et al., 2023]. Была показана принципиальная возможность записи выброса на такой системе. На картах видна ширина фронта распространяющегося выброса (примерно 0.1–0.15 а.е.). Такие же меридианные значения ширины фронта КВМ (0.1–0.15 а.е.) приведены в работе [Ghuge et al., 2025] после исследования 152 выбросов.

Главным достоинством систем апертурного синтеза при прогнозировании космической погоды является возможность отслеживать выброс, переключая диаграмму направленности как по прямому восхождению, так и по склонению. Главным недостатком таких систем является большое время обработки при построении карт, т. е. выбросы будут выявлены только при постобработке. Для меридианных инструментов обработка наблюдений может делаться фактически в режиме реального времени, так как задержка связана лишь с ожиданием записи источника при его прохождении через меридиан, а сама обработка происходит практически мгновенно.

В настоящей работе мы рассматриваем возможность создания специализированного инструмента, который позволит проводить и обрабатывать наблюдения в режиме «почти реального времени».

## ТРЕБОВАНИЯ К НОВОМУ РАДИОТЕЛЕСКОПУ

Для создания специализированного радиотелескопа, позволяющего делать прогноз космической погоды в режиме «почти реального времени», необходимо иметь ответы на два главных вопроса, а именно, какую чувствительность должен обеспечивать инструмент и сколько мерцающих радиоисточников нужно наблюдать для получения прогноза.

Очевидно, что новый телескоп должен реализовать систему апертурного синтеза, которая позволит после первоначального обнаружения выброса отслеживать его по всему фронту, переключая центральный луч как по прямому восхождению, так и по склонению. Для уменьшения времени обработки необходимо, чтобы внутри площадки, на которой проводится синтез карты, были образованы лучи, направленные на заранее выбранные мерцающие радиоисточники. При этом карту, получаемую методом апертурного синтеза, можно не делать.

С точки зрения наблюдателя, межпланетные мерцания — это случайные изменения плотности потока (интенсивности) излучения с характерным временным масштабом от долей секунды до секунды. Ежедневные измерения флуктуирующего потока источников показывают, что на какой-то элонгации в индексе мерцаний источника наблюдается сперва максимум, а затем плавное падение. Величина максимума зависит от угловых размеров источника и для точечного источника достигает единицы, а на больших элонгациях выходит на уровень примерно 0.1, т. е. максимальный перепад индекса мерцаний может составлять один порядок величины [Readhead, 1971; Mariani, 1975; Manoharan et al., 1995]. Если источник не точечный, максимум индекса мерцаний меньше единицы и перепад между максимумом и минимумом индекса мерцаний будет меньше. Индекс мерцаний  $m$  определяется следующим образом:

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

где  $I$  — наблюдаемое значение текущей интенсивности. Таким образом, каким бы сильным ни был КВМ, изменения индекса мерцаний всегда будут меньше одного порядка величины. На практике эти изменения составляют 2–6 раз, поскольку компактные радиоисточники обычно не точечные и на наилучших элонгациях их индекс мерцаний заметно меньше единицы.

Типичная глубина фронта КВМ, как указано выше, 0.1–0.15 а.е., или 9°–14°. Для его достоверного обнаружения (отслеживания фронта по глубине) мы должны записывать по нескольку источников, находящихся в области, до которой выброс еще не дошел, в области выброса и в области, которую выброс уже прошел. Таким образом, на глубину фронта КВМ должно попасть хотя бы 2–3 компактных источника, которые радиотелескоп должен отследить. Следовательно, если исходить только из глубины фронта, радиотелескоп должен обеспечить наблюдения источников с плотностью не хуже чем один источник на 3–5 кв. град.

Ширина фронта КВМ, согласно наблюдениям, меняется в очень широких пределах — от 2° до 360° в плоскости неба (см., например, [Wang et al., 1998; Yashiro et al., 2004; Chen, 2011]). Очевидная проблема заключается в том, что мы можем пропустить узкий выброс, поскольку нам необходимо увидеть мерцающие источники на луче зрения, а для узкого выброса, идущего на нас, элонгации могут попасть в область  $\varepsilon < 25^\circ$ , где степень межпланетных мерцаний в метровом диапазоне резко падает. Однако, сколь-

бы узким выброс ни был, при приближении к Земле в какой-то момент он займет все поле зрения радиотелескопа, т. е. мы будем видеть его на всех элонгациях. Можно рассчитать расстояния от Солнца, на которых мы успеваем дать прогноз для выброса любой ширины. Так, для выброса шириной 2° это расстояние будет меньше 1.5 млн км от Земли, и это означает, что обнаружение такого выброса сначала произойдет в точке L1. В этом случае наш прогноз будет бесполезен. Расчеты показывают, что для обнаружения выброса его минимальная ширина должна быть 20°. В этом случае мы успеваем обнаружить выброс примерно на расстояниях 0.9 а.е. от Солнца (0.1 а.е. до Земли). При скорости КВМ 1000 км/с 0.1 а.е. до Земли фронт выброса пройдет за 4 ч, и останется время для повторного наблюдения, позволяющего оценить скорость распространения выброса.

К счастью, общее количество узких выбросов относительно невелико. Согласно работе [Yashiro et al., 2004], узкие (ширина фронта  $\leq 20^\circ$ ) выбросы, наблюдаемые в белом цвете, за период 1996–2002 гг. составляли в разные годы от 11 до 23 % (медианное значение 16 %). При этом даже при небольшом своем отклонении от линии Солнце—Земля выброс может пройти мимо Земли или задеть ее по касательной, не вызвав существенных изменений в магнитосфере.

Исходя из глубины фронта выброса и его минимальной ширины получаем область размером 20°×10°, что, заметим, забегая вперед, в два раза меньше площади, покрываемой диаграммой направленности модуля, который состоит из антенных элементов, выстроенных в порядке 4×4. Для точного определения скорости движения фронта необходимо наблюдать источники перед фронтом, во фронте выброса и после фронта. Мы полагаем, что для надежности прогнозирования необходимо иметь равномерное покрытие источников диаграммой направленности модуля и 6–7 мерцающих радиоисточников в области выброса до, во время и после его прохождения. Тогда в поле зрения модуля должно попадать не менее 20 источников и необходимая минимальная плотность источников должна быть один источник на 20 кв. град.

Согласно работе [Artyukh et al., 1998], в результате поиска мерцающих радиоисточников на частоте 102.5 МГц в площадке размером 300 кв. град. найдено 144 мерцающих источников, имеющих флуктуации плотности потока  $\Delta S \geq 0.4$  Ян. Это соответствует плотности 1 источник на 2 кв. град. Установим минимальный уровень флуктуаций плотности потока источников  $\Delta S = 0.4$  Ян на частоте 102.5 МГц. В реальных наблюдениях этот уровень  $\Delta S$  не является избыточным, поскольку регистрируемое значение  $\Delta S$  падает с увеличением элонгации, а оценки  $\Delta S$  из работы [Artyukh et al., 1998] относятся к наблюдениям на наилучших доступных элонгациях. Таким образом, на практике мы должны уметь оценивать индекс мерцаний для источников в 2–6 раз более слабых.

В первую очередь следует определиться с рабочим диапазоном частот, на которых планируется проводить наблюдения мерцающих источников. Максимум мерцаний компактных (меньше 1") источников на межпланетной плазме приходится на метро-

вый диапазон радиоволн, при этом чем выше частота, тем на меньших элонгациях возможны наблюдения. В низкочастотной части метрового диапазона 30–70 МГц очень высоки шумы неба (высокая температура галактического фона), что уменьшает чувствительность, а также возможно мешающее влияние ионосферы Земли, приводящее к сильным ионосферным мерцаниям источников и видимому сдвигу их координат. Кроме того, диапазон 87–108 МГц занят радиовещательными станциями. Полоса частот 240–290 МГц практически полностью занята радионавигационными станциями и телеметрией космос—Земля. Поэтому в метровом диапазоне для мониторинга состояния межпланетной плазмы с помощью радиотелескопа оптимальным является диапазон частот 120–240 МГц.

Исходя из минимального уровня флуктуаций потока  $\Delta S=0.4$  Ян на частоте 102.5 МГц, можно определить необходимую чувствительность радиотелескопа на средней частоте диапазона новой антенны 180 МГц. При предполагаемом спектральном индексе  $\alpha=0.7$  ( $S \sim \nu^{-\alpha}$ ) для внегалактических компактных радиоисточников пороговая плотность потока опустится до  $\Delta S=0.26$  Ян. С учетом снижения чувствительности при отклонении луча от нормали к плоскости фазированной антенной решетки (ФАР) в 4 раза для углов места  $30^\circ$  и более, для уверенного отслеживания изменения индекса мерцаний на разных элонгациях пороговая чувствительность радиотелескопа должна обеспечивать отношение сигнал/шум ( $S/N$ ) не менее 50 для источника, наблюдаемого в зените. Тогда при наилучших условиях наблюдений мы сможем использовать источники, флуктуации плотности потока которых будут  $0.26/4=0.065$  Ян при  $S/N=12$ . Как показано в работах [Artyukh, Tyul'bashev, 1996a, b], при таких значениях  $S/N$  удается надежно работать с мерцающими радиоисточниками. Используя определение чувствительности радиометра полной мощности для радиотелескопа, можно определить необходимую эффективную площадь антенны при заданных полосе частот и времени накопления сигнала по следующей формуле:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{\Delta S} \frac{S}{N\sqrt{n\Delta\nu\tau}},$$

где  $S/N=50$ ,  $k$  — постоянная Больцмана;  $T_{\text{sys}}$  — температура системы;  $\Delta S=0.26$  Ян минимальный уровень флуктуаций потока источника;  $\tau$  — время накопления сигнала;  $\Delta\nu$  — полоса приема;  $n$  — число поляризацій.

Температура системы определяется как температура фона Галактики плюс температура приемника. Согласно работе [Turtle, Baldwin, 1962], температура фона на частоте 178 МГц изменяется от 120 К вне плоскости Галактики до более чем 2000 К в плоскости Галактики. Однако область высоких температур занимает на небе узкую полосу (менее  $\pm 10^\circ$  от плоскости Галактики), а вне плоскости Галактики для оценок можно принять температуру фона 200 К на частоте 180 МГц. Предполагаем температуру приемника 100 К, получаем  $T_{\text{sys}}=300$  К вне плоскости Галактики.

При времени накопления сигнала 15 мин, полосе регистрации 15 МГц, а также приеме сигнала в двух

поляризациях расчетная эффективная площадь антенны должна быть не менее  $970 \text{ м}^2$ .

## ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗОВОГО АНТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА И МОДУЛЯ

В настоящий момент известны два активно работающих на низких частотах (метровый диапазон) радиотелескопа нового поколения: LOw-Frequency ARray (LOFAR) [van Haarlem et al., 2013] и Murchison Widefield Array (MWA) [Tingay et al., 2013]. LOFAR имеет две антенных системы: низкочастотную диапазона 30–80 МГц и высокочастотную 120–240 МГц. MWA работает в диапазоне 80–300 МГц. В обоих радиотелескопах в качестве антенного элемента фазированной решетки используется широкополосный диполь.

Характеристики антенного элемента ФАР определяют рабочий диапазон частот, поле зрения антенны радиотелескопа в целом, а также необходимое число элементов для заданной эффективной площади антенны радиотелескопа. Рабочий диапазон частот радиотелескопа выбран нами в диапазоне от 120 до 240 МГц, и антенный элемент должен обеспечить эффективную работу в этой полосе частот. Диапазон углов отклонения луча антенны от нормали к плоскости антенной решетки (поле зрения) также определяется диаграммой направленности антенного элемента, а коэффициент усиления (эффективная площадь) антенного элемента прямо зависит от диаграммы направленности: чем уже диаграмма, тем выше коэффициент усиления. Для широкополосной антенны ширина диаграммы направленности и коэффициент усиления антенны зависят от частоты. Согласование антенны с нагрузкой, определяющее, какая часть мощности принятого сигнала передается в нагрузку, также зависит от частоты и является важнейшим параметром широкополосной антенны.

Следует также отметить, что в антенных решетках используются однонаправленные антенные элементы, т. е. излучатели с экраном. Суммарное поле излучения формируется полем антенны и отраженным полем, расстояние между антенной и экраном определяет направление максимума излучения. В направлении перпендикулярном плоскости экрана максимум излучения будет при расстоянии  $0.25\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны) между экраном и антенной, поскольку поле антенны и отраженное поле складываются в фазе. В связи с тем, что длина волны в рабочем диапазоне изменяется от 1.25 до 2.5 м, расстояние от антенны до экрана оптимизируем для центральной частоты диапазона 180 МГц. Расстояние между экраном и излучателем влияет также на ширину диаграммы направленности и коэффициент усиления, частотные характеристики антенны и ее согласование с нагрузкой.

В качестве базового антенного элемента можно использовать различные варианты широкополосных диполей, как в LOFAR и MWA, или широкополосные антенны с замкнутым контуром, как в макете радиотелескопа метрового диапазона с широким полем



Рис. 2. Антенные элементы «бабочка» (слева) и «дельта» (справа) на испытательном стенде

зрения [Dagkesamanskii et al., 2020]. С целью выбора оптимального антенного элемента для предлагаемого телескопа нами проведены исследования двух антенных элементов: диполя с треугольным плечом (диполь типа «бабочка») и антенны в виде треугольного замкнутого контура (антенна типа «дельта»). Были выполнены модельные расчеты параметров антенн и экспериментальные исследования макетов антенных элементов.

Перечислим работы, которые делались, не углубляясь в детали. Для антенного элемента учитывалось: сплошное или несплошное заполнение диполя; толщина проводящих элементов; точка подключения нагрузки; сопротивление нагрузки; центральная частота приема; значение входного сопротивления; зависимость сопротивления антенны от частоты; коэффициент трансформации симметрирующего устройства; получаемое поле зрения. В результате было получено оптимальное согласование по всему рабочему диапазону частот для обоих проверяемых антенных элементов. Моделирование элементов проводилось при помощи программы MMANA-GAL [Гончаренко, 2002], а также пакета расширения Antenna Toolbox [<https://www.mathworks.com/products/antenna.html>] для среды программирования Matlab. На рис. 2 показаны макеты исследуемых антенных элементов с экраном 2.5×2.5 м, изготовленные по результатам моделирования антенных элементов.

Измерения характеристик макетов антенных элементов подтвердили расчетные параметры диполя «бабочка» и антенны «дельта». Для предлагаемого радиотелескопа широкополосный диполь «бабочка» оказался предпочтительнее антенны «дельта», поскольку имеет более широкую диаграмму направленности (поле зрения) и лучшее согласование антенны с нагрузкой в полосе частот 120–240 МГц.

Таким образом, был разработан вариант широкополосного диполя с экраном, оптимизированным на частоту 180 МГц. На рис. 3 показана диаграмма направленности диполя на частоте 180 МГц в диапазоне углов 0°–180° от плоскости экрана. Ширина

диаграммы направленности по половинной мощности (на рис. 3 сектор С1–С2, выделенный цветом) равна 98°, что близко к требуемым ±50°.

На частоте 150 МГц ширина диаграммы направленности составляет 90°, а на частоте 210 МГц — 108°. Эффективная площадь диполя падает от 3 м<sup>2</sup> на частоте 120 МГц до 0.7 м<sup>2</sup> на частоте 240 МГц. На эффективность работы антенны влияет также ее согласование с нагрузкой. Для разработанного антенного элемента коэффициент потери мощности из-за рассогласования с нагрузкой падает с ростом частоты: 50 % на частоте 120 МГц и 8 % на частоте 240 МГц. С учетом рассогласования антенны эффективная площадь диполя равна 1.5–0.65 м<sup>2</sup> по рабочему диапазону частот, примерно 1.1 м<sup>2</sup> в середине диапазона. Для формирования эффективной площади антенны 1000 м<sup>2</sup> необходимо иметь в составе ФАР около 1000 широкополосных диполей.

Большое число элементов ФАР при корреляционной обработке сигналов от каждого элемента требует больших вычислительных мощностей коррелятора и большого числа аналогово-цифровых преобразователей с предварительной цифровой обработкой сигналов. Чтобы снизить объемы вычислений, в радиотелескопах LOFAR (высокочастотная часть) и MWA часть элементов фазуруется аналоговым способом, с помощью управляемых линий задержек формируя антенный модуль из 16 элементов (антенная решетка 4×4 базовых антенных элемента).

Такой вариант подходит и для предлагаемого радиотелескопа. Антенный модуль 4×4 имеет диаграмму направленности шириной примерно 20°±5° в зависимости от частоты и конфигурации решетки. В результате видимая площадка на небе будет 300 и более квадратных градусов, что, как было показано выше, позволяет одновременно наблюдать более 100 компактных (мерцающих) источников.

Для оценки параметров антенного модуля 4×4 были выполнены расчеты для различных расстояний (шага решетки) между элементами модуля. Как известно, условием единственности луча (дифракцион-

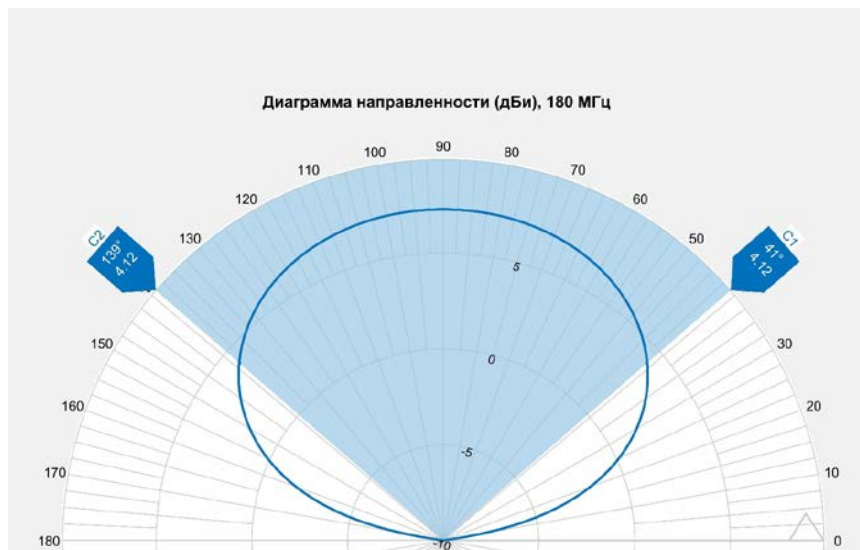


Рис. 3. Диаграмма направленности диполя с экраном на частоте 180 МГц в полусфере. Цифры по радиусу показывают амплитуду сигнала (в дБи) по отношению к изотропному излучателю

Выходные параметры антенного модуля для разных частот

Параметр	150 МГц			180 МГц			210 МГц		
	$d=1.2$	$d=1.1$	$d=1.0$	$d=1.2$	$d=1.1$	$d=1.0$	$d=1.2$	$d=1.1$	$d=1.0$
Ширина луча (град.)	24	25	28	20	22	24	16	18	20
Эффективная площадь (м <sup>2</sup> )	24	21	17.6	22	19.2	16.5	19.5	18.2	15.4
Поле зрения — площадь сечения луча (кв. град.)	528	576	728	360	440	528	256	324	400
Зенитный угол при уровне гармоники луча $\leq$ бок. лепестков (град.)	$\pm 33$	$\pm 45$	$\pm 57$	$\pm 15$	$\pm 25$	$\pm 32$	0	$\pm 10$	$\pm 17$
Потери мощности из-за рассогласования диполя (среднее значение, %):									
	на нагрузке 300 Ом	21	20	14	13	10.5	6	11	7
на нагрузке 200 Ом	–	14.5	–	–	13	–	–	15	–

ного максимума) антенной решетки в пределах действительных углов антенны является требование к расстоянию между элементами решетки, которое не должно превышать половины длины волны на рабочей частоте антенны [Воскресенский, 1981]. В нашем случае расстояние между элементами антенной решетки на нижней частоте диапазона должно быть не более 1.25 м, на верхней частоте — не более 0.625 м. Как видим, в столь большом частотном диапазоне мы не можем обеспечить отсутствие дополнительных лучей антенной решетки, поскольку в верху частотного диапазона расстояние между элементами должно быть меньше геометрических размеров антенного элемента. Кроме этого, чем ближе антенные элементы расположены друг к другу, тем больше их взаимное влияние, что искажает их характеристики. Расчеты параметров антенного модуля для шагов прямоугольной решетки  $d=1.2, 1.1$  и  $1$  м приведены в таблице.

Расчеты выполнены для частот 150, 180 и 210 МГц, потери мощности из-за рассогласования диполя приведены для нагрузок 300 и 200 Ом. Расчеты согласования диполей с нагрузкой проводились с учетом взаимного влияния элементов в решетке, в таб-

лице приведено усредненное значение для 16 диполей. В таблице приведен сектор зенитных углов (решетка установлена горизонтально), в котором амплитуда гармоники основного луча диаграммы направленности меньше уровня бокового лепестка антенной решетки. Исходя из выбранных эффективной площади, поля зрения и согласования антенны, предпочтительным является шаг решетки  $d=1.1$  м для антенного модуля  $4 \times 4$ .

На рис. 4 показана расчетная диаграмма направленности антенного модуля с шагом решетки 1.1 м на частоте 180 МГц. Лучи, показанные на рисунке, соответствуют направлениям, формируемым фазирующей системой с шагом задержки  $\Delta t=0.5n$  нс, где  $n$  — целые числа от 0 до 7. Луч в зенитном направлении (фазовая задержка равна 0) закрашен красным цветом, для него указана ширина луча по половинной мощности (C1–C2).

На рисунке видно, что при отклонении луча от нормали к плоскости решетки на  $45^\circ$  и более гармоника основного луча решетки превышает амплитуду основного луча. Возникает неоднозначность в определении местоположения источников на небе. Однако при наблюдениях с накоплением сигнала источника

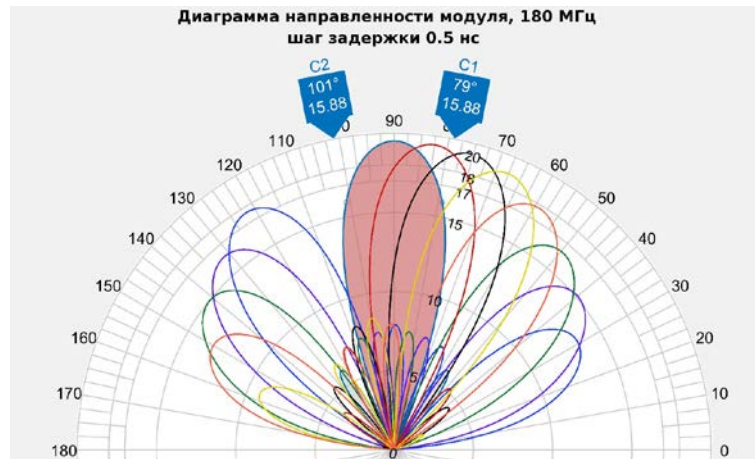


Рис. 4. Расчетные положения лучей антенного модуля с шагом задержки  $\Delta t = 0.5n$  нс в полусфере. Коэффициент усиления антенного модуля указан цифрами (в дБн) по радиусу по отношению к изотропному излучателю



Рис. 5. Макет антенного модуля 4×4

(сопровождением источника) в режиме полной ФАР скорость видимого движения источников для разных склонений будет различна и сигнал будет накапливаться только для наблюдаемого источника, что решает проблему неоднозначности.

Чувствительность радиотелескопа, помимо других параметров, определяется собственными шумами приемной системы. Для того чтобы минимизировать шумы и исключить потери сигнала в тракте передачи от антенны ко входу приемника, усилитель сигнала стараются разместить непосредственно на антенне. Этот антенный усилитель при минимальном собственном шуме должен иметь коэффициент усиления достаточный, чтобы последующие элементы радиочастотного тракта не увеличивали шумы приемника. В расчетах чувствительности радиотелескопа предполагалось, что шум приемной системы не превышает 100 К, соответственно, собственный шум антенного усилителя не должен превышать этого значения. В настоящее время элементная база радиоэлектроники позволяет без больших затрат реализовать антенный усилитель с такими параметрами. Нами был разработан антенный усилитель с собственными шумами 70 К и коэффициентом усиления 22 дБ в рабочей полосе частот. Этот усилитель использовался при макетировании антенного модуля 4×4.

Для экспериментальной проверки был изготовлен макет антенного модуля 4×4 на основе широкополосного диполя «бабочка» с экраном, малошумящим антенным усилителем и управляемой фазирующей системой с шагом задержки 0.5 нс в диапазоне от 0 до 15.5 нс.

### Антенный модуль

#### Реализация

Антенный модуль был выполнен из базовых антенных элементов, выстроенных в направлениях север-юг/запад-восток в формате 4×4 с шагом 1.1 м между элементами. Внешний вид макета антенного модуля 4×4 представлен на рис. 5. Для приема сигнала в двух поляризациях диполи каждой поляризации конструктивно объединены в один элемент с их ортогональной ориентацией. Антенные усилители установлены непосредственно на диполях, подключены к фазирующей системе коаксиальными кабелями равной длины. По этим же кабелям подается напряжение питания антенных усилителей. В качестве экрана используется металлическая сетка с ячейкой 5×5 см, уложенная на горизонтальной площадке. Фазирующая система модуля размещена в закрытом металлическом ящике. Испытания антенного модуля идут более года, поскольку необходимо оценить работоспособность модуля, стабильность его работы

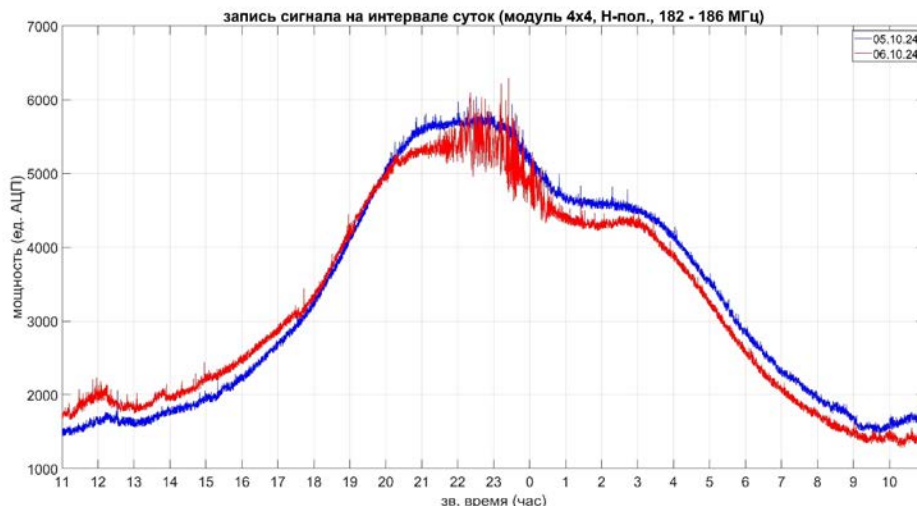


Рис. 6. Суточная запись сигнала на выходе антенного модуля 6 и 7 октября 2024 г. (красная и синяя кривые соответственно). Ионосферные мерцания длительностью около 2.5 ч с максимумом в районе 23<sup>h</sup> принадлежат источнику 3С 461, имеющему координаты по прямому восхождению 23<sup>h</sup>23<sup>m</sup>27<sup>s</sup>

при разных атмосферных условиях, включая заснеженность.

#### Наблюдения

В качестве приемника-регистратора для антенного модуля использовался радиометр полной мощности, работающий в полосе 4 МГц на частоте приема 184 МГц. Поскольку размер диаграммы направленности луча порядка 20°, а эффективная площадь модуля около 16 м<sup>2</sup>, в диаграмму попадает большое число источников, включая и плоскость Галактики. Выделить на этом фоне отдельный источник не представляется возможным. Сильнейшие радиоисточники 3С 405 (Лебедь А) и 3С 461 (Кассиопея А) теряются на фоне сигнала от плоскости Галактики. На рис. 6 представлены две последовательные суточные записи. Положение луча на небе фиксировано, поэтому система работает как обычный меридианный инструмент. Примерно в 23<sup>h</sup>23<sup>m</sup> на записи за 6 октября 2024 г. (красная кривая) видны частые осцилляции. В этот день по данным радиотелескопа БСА наблюдалась сильная ионосферная буря. Видимые осцилляции — это ионосферные мерцания Кассиопеи, что позволяет выделить этот источник и оценить ширину диаграммы направленности модуля.

Измеренная в этом случае по источнику 3С 461 ширина диаграммы направленности антенного модуля 4×4 по половинной мощности на частоте 184 МГц равна 21°±1°, что хорошо согласуется с расчетным значением.

Важной практической задачей при исследовании характеристик макета является определение влияния атмосферных осадков и снежного покрова на работу антенного модуля, поскольку антенны расположены на высоте 35 см от поверхности земли и закрыть их от атмосферных осадков не представляется возможным. К сожалению, зима 2024–2025 гг. оказалась малоснежной, на рис. 5 показан максимальный снежный покров. Высота снежного покрова около 15 см, нижние углы плеч диполей находятся в снегу. Форма сигнала на интервале суток не изменилась в сравне-

нии с записями без снежного покрова, влияния снега на работу антенного модуля в течение зимы мы не увидели. Поскольку диэлектрическая проницаемость сухого снежного покрова  $\epsilon = 1.1$ , что мало отличается от воздуха, этот результат вполне объясним. Заметного влияния дождя на работу модуля также не обнаружено. На уровень выходного сигнала значительное влияние оказывает изменение окружающей температуры. Температурные изменения коэффициента усиления антенного усилителя приводят к изменению уровня сигнала до 1 дБ, в зависимости от величины изменения температуры (температурный коэффициент примерно 0.02 дБ/град.).

#### Приемная система и коррелятор

В настоящей работе мы рассмотрели антенную часть радиотелескопа, определяющую его основные возможности. Помимо этой части есть приемная система, связанная с оцифровкой сигнала, и коррелятор сигналов, приходящих от разных модулей. Оцифровка сигнала и корреляция сигналов — стандартные процедуры, многократно реализованные в разных вариантах (см., например, [van Haarlem et al., 2013; Tingay et al., 2013]) в том числе в Астрономическом центре ФИАН [Likhachev et al., 2017], являющемся головной организацией ПРАО (Пушинская радиоастрономическая обсерватория). Эти вопросы в приложении к предлагаемой нами антенне предполагается рассмотреть в отдельной работе. В настоящей работе мы не уделяем им внимания, но отмечаем ниже, какие моменты при реализации радиотелескопа нужно учитывать.

Приемная система радиотелескопа должна соответствовать следующим требованиям:

- фильтрация, настройка уровня сигнала в каналах (аналоговая часть);
- оцифровка сигнала (12-битовая АЦП с частотой оцифровки лучше чем 500 МГц);
- работа всех цифровых приемников от одного источника опорной частоты и их синхронизация по времени;

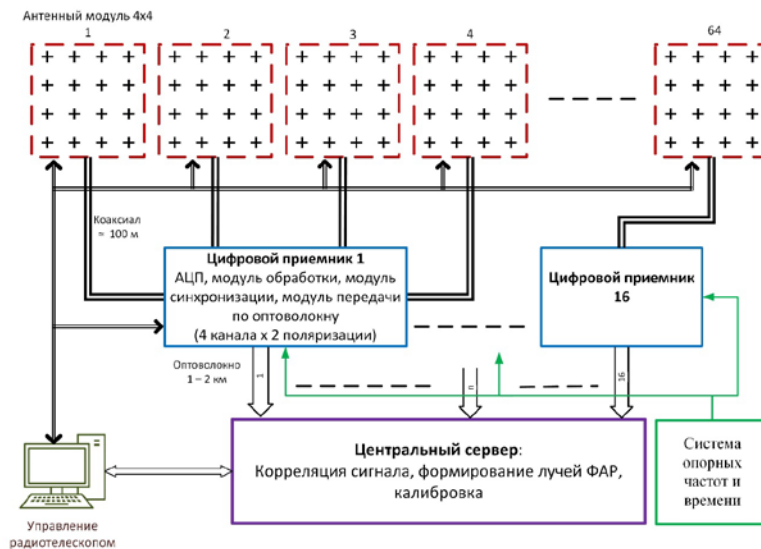


Рис. 7. Структурная схема радиотелескопа для мониторинга состояния межпланетной плазмы

- при обработке сигнала использование полифазного фильтра для десемплирования и формирования полосы регистрации сигнала до 32 МГц с отстройкой от помех, снижением разрядности до 8 бит (младшие биты пикут шумы и могут быть удалены);
- передача оцифрованного сигнала со скоростью до 640 Мб/с в одной поляризации от отдельного модуля в буферную память коррелятора;
- буферизация данных 128 приемных каналов с потоком до 640 Мб/с в канале на входе коррелятора;
- корреляция в реальном режиме времени. Число одновременно формируемых лучей антенной решетки — не менее 20, что эквивалентно 20 одновременно работающим корреляторам. Типичное время сопровождения источника — от 15 до 30 мин. Коррелятор предполагается программный и создается на основе графических ускорителей (GPU).

Общая структурная схема радиотелескопа приведена на рис. 7. В составе радиотелескопа 64 антенных модуля 4×4, что обеспечивает эффективную площадь ФАР 1000 м<sup>2</sup> на частоте 180 МГц. Каждый модуль обеспечивает прием в двух ортогональных линейных поляризациях.

Прием, оцифровку и предварительную обработку сигнала обеспечивают шестнадцать 8-канальных цифровых приемников. Цифровые приемники синхронизованы от единой системы опорных частот и времени. Оцифрованный сигнал передается по оптоволоконным линиям связи на центральный вычислительный сервер, обеспечивающий корреляцию сигнала, формирование в реальном времени не менее 20 независимых лучей для наблюдаемых источников и их сопровождение на интервале не менее 15 мин.

Конфигурация размещения антенных модулей для наблюдения мерцающих источников требует обеспечения углового разрешения не менее 20' (не хуже, чем у радиотелескопа БСА ФИАН), при этом нет задачи построения карты области наблюдения. В таком случае наиболее оптимальным с точки зрения минимизации расходов на линии связи и помещения для приемной аппаратуры будет размещение

антенных модулей в вершинах равностороннего треугольника со стороной 400–500 м (при этом обеспечивается угловое разрешение 11'–14' на частоте 180 МГц). При необходимости расширения круга задач антенна радиотелескопа может быть дополнена модулями для более равномерного заполнения апертуры и лучшего покрытия UV-плоскости наблюдаемого участка неба.

## ДРУГИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НОВОЙ АНТЕННЫ

Наблюдения, связанные с прогнозом космической погоды, идут в дневное время. Ночное время может быть использовано для решения других задач. Рассмотрим относительно подробно задачу поиска и исследования пульсаров и транзиентов, а также кратко опишем другие задачи, которые можно решать с помощью радиотелескопа. Для прогнозирования планируется использовать всего 20 лучей. Однако при условии сохранения исходных (сырых) данных после дневного сеанса можно строить карты, содержащие в площадке 20°×20° 3500 лучей, если угловое разрешение системы 20', и 14500 лучей, если угловое разрешение системы 10'.

Согласно разделу «Требования к новому радиотелескопу», на интервале 15 мин наблюдений в полосе 15 МГц обеспечивается чувствительность примерно 260 мЯн на частоте 180 МГц. Учитывая, что для наблюдений пульсаров и транзиентов желательное время опроса точки порядка 1 мс, можно определить чувствительность для наблюдений типичного медленного пульсара с периодом 0.5 с. Мгновенная чувствительность будет 4.7 Ян при  $S/N=1$  и 28 Ян при  $S/N=6$ . При синхронном суммировании всех импульсов с известным периодом пульсара на 15-минутном интервале и при длительности импульса пульсара 10 % от периода чувствительность улучшится до ~0.22 Ян (при  $S/N=6$ ).

Наблюдая площадки по программе «Космическая погода» ежедневно и накопив сигнал за год, при некогерентном суммировании сигнала можно

получить улучшение  $S/N$  в  $365^{1/2} = 19$  раз, что позволит искать пульсары с плотностями потока около 11 мЯн и проводить их долговременное исследование. При специально организованных наблюдениях длительностью 8 ч в ночное время можно наблюдать пульсары с интегральной плотностью потока 2 мЯн, что сравнимо с чувствительностью LOFAR.

Помимо поиска новых пульсаров, в ежедневном режиме будут наблюдаться ранее открытые пульсары. Можно проводить их поляризационные исследования, долговременные наблюдения, позволяющие разделить внутреннюю (собственную) и внешнюю (обусловленную межзвездной средой) переменность, делать тайминг пульсаров, для которых он пока не сделан, искать глитчи и т. д.

За последние два года открыты больше десяти так называемых долгопериодических транзиентов (LPT). Периоды этих транзиентов от 7 мин до 6.45 ч, а ширина импульса от десятков секунд до десяти минут [Dong et al., 2025; Lee et al., 2025]. Природа LPT не известна. Основной предлагаемый способ поиска — это построение карт на разных временных интервалах, а затем их просмотр и поиск возникших «из ниоткуда» источников [de Ruiter et al., 2024]. Ежедневные наблюдения неба позволят обнаружить все LPT-источники, плотность потока которых может составлять доли янских.

Помимо пульсаров и транзиентов в поле зрения телескопа в каждой наблюдаемой площадке попадает не менее 200 мерцающих радиисточников, т. е. примерно от 2000 до 4000 источников ежедневно, если мы наблюдаем 9–18 площадок в день (см. следующий раздел). Кривые блеска за несколько лет позволят увидеть мерцания источников на межзвездной плазме и восстановить с высокой точностью распределение плазмы на луче зрения с угловым разрешением по небесной сфере 2–4 кв. град. [Tyul'bashev et al., 2019].

Наблюдения проводятся в полосе 15 МГц, которая может смещаться в диапазоне 120–240 МГц. Если сохранены сырые данные, можно сформировать сколь угодно узкие частотные каналы и наблюдать спектральные линии, имеющие разное происхождение. Эти линии также могут быть накоплены на долговременных интервалах.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поле зрения модуля составляет  $\sim 20^\circ \times 20^\circ$ . Наблюдения должны проводиться на элонгациях больше  $\pm 25^\circ$ , т. е. центральные  $50^\circ$  фронта (часть кольцевой структуры выброса), идущего на нас, не видны в мерцаниях. Однако, если выброс идет строго на нас, должны наблюдаться одинаковые изменения индекса мерцаний за пределами элонгаций  $\pm 25^\circ$ . Напомним, что в зените и по центру диаграммы направленности будут обнаруживаться мерцающие источники с флуктуациями плотности потока 0.065 Ян при  $S/N = 12$ .

По элонгациям необходимо покрыть площадки, располагающиеся между  $25^\circ$  и  $90^\circ$ . Длительность записи составляет 15 мин. Покрываемые ширина и глубина фронта составляют  $20^\circ$ . Следовательно, необходимо проводить наблюдения девяти площадок. Просмотр этих площадок займет  $\sim 2$  ч.

Если внутри проверяемой площадки будет обнаружен выброс, нужно провести наблюдения площадки, располагающейся зеркально симметрично к меридиану, проходящему через Солнце, относительно площадки с выбросом. Такие наблюдения зафиксируют индексы мерцаний по обе стороны от Солнца и дадут точное направление распространения выброса относительно линии Солнце—Земля [Glyantsev et al., 2014]. Чередуя две площадки, где точно должен быть выброс, мы определим его скорость. Так, при скорости 1000 км/с выброс пройдет расстояние 1 а.е. (или по элонгациям от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ) примерно за 41.7 ч (или  $\sim 2^\circ$  по элонгациям в час). После обнаружения выброса можно переключаться каждые полчаса (по 15 мин на площадки по разные стороны от Солнца) на ожидаемые места расположения выброса и очень точно оценить скорость его распространения. Для обычного выброса, имеющего скорость 800–1000 км/с, за два дня наблюдений можно получить оценку скорости распространения 5–6 раз. В данный момент по наблюдениям на БСА оценить скорость выброса получается 1–2 раза за время его прохождения, т. е. за два-три дня. Поскольку мы будем иметь оценку скорости несколько раз в день, ожидается точность оценки времени прихода выброса к Земле лучше, чем по наблюдениям на БСА (сейчас типичная точность 1–3 ч [Glyantsev et al., 2015]). Ожидаемая точность прогнозирования времени прихода выброса на новой антенне не хуже одного часа.

С другой стороны, нельзя исключить появления новых выбросов. Поэтому более оптимальный путь — проводить наблюдения 2–3 раза в день (временные затраты 1–1.5 ч) до тех пор, пока не обнаружится выброс, и затем потратить оставшееся время на поиск возможных новых выбросов. Предлагаемый подход позволяет давать прогноз несколько раз в день.

Для прогнозирования космической погоды рассмотрен вариант радиотелескопа, который состоит из 64 антенных модулей или 1024 базовых антенных элементов. Что изменится, если модулей будет 32 или 128? Поскольку эффективная площадь прямо пропорциональна количеству модулей, мгновенная чувствительность антенны уменьшится/увеличится в два раза.

Сначала еще раз рассмотрим вариант радиотелескопа из 64 модулей. Как отмечено выше в этом разделе, источники с  $\Delta S = 0.26$  Ян будут легко обнаруживаться при наблюдениях на углах близких к горизонту и на краю диаграммы направленности. Это соответствует уровню  $\Delta S \geq 0.4$  Ян на частоте 102.5 МГц. Согласно работе [Artyukh et al., 1998], в площадке 450 кв. град. находится 214 мерцающих радиисточников. Соответственно, один источник приходится на 2.0 кв. град. В поле зрения модуля (400 кв. град.) должно в среднем находиться 190 источников с такими плотностями потока. Наблюдения планируются в 20 лучах, поэтому нам необходимо выбрать из этих 190 источников 20, которые мы и будем наблюдать в выбранной площадке.

При реализации радиотелескопа из 32 модулей для компенсации уменьшившейся чувствительности необходимо в 4 раза увеличивать время наблюдений, т. е. вместо 15 мин на просмотр одной площадки нужно

будет затратить один час. На просмотр девяти площадок уйдет девять часов. Прогнозирование при прочих равных условиях будет возможно 1 раз в день. На просмотр площадок, располагающихся по элонгациям с другой стороны от Солнца, при проведении оценки симметричности выброса относительно линии Солнце—Земля не останется времени. Оценка скорости в лучшем случае будет дана по двум точкам. Отслеживание новых выбросов становится невозможным.

Единственная разумная компенсация ухудшения чувствительности — 32-модульной системой проводить наблюдения в два раза более сильных источников, чем 64-модульной системой ( $\Delta S \geq 0.8$  Ян на частоте 102.5 МГц). Согласно работе [Artyukh et al., 1998], в площадке 450 кв. град. находится 89 мерцающих источников с плотностью потока мерцающей компоненты больше 0.8 Ян. Соответственно, 1 источник приходится на 5 кв. град. В поле зрения модуля (400 кв. град.) должно в среднем находиться 79 источников с такими плотностями потока. Задача прогнозирования все еще выполнима, но с учетом типичной глубины фронта она находится на пределе возможностей инструмента. Поиск КВМ возможен, но не может быть гарантирован. Главным выигрышем при таком варианте антенны является сокращение в четыре раза времени счета при переборе фазовых задержек. Набор научных задач, которые можно решать на таком радиотелескопе, станет очень ограниченным.

Для 128-модульной конструкции телескопа увеличение мгновенной чувствительности в два раза позволяет сократить время наблюдений одной площадки в четыре раза, т. е. на просмотр площадки будет тратиться 4 мин. За примерно один час будет проведен полный просмотр 18 площадок, по 9 площадок с каждой стороны от Солнца (при  $\Delta S = 0.26$  Ян). Проводя ежедневно наблюдения площадки общим размером  $400 \times 18 = 7200$  кв. град., мы также ежедневно сможем давать оперативный прогноз. Со 128-модульным телескопом появится возможность отслеживать выброс по всей длине фронта, а не только его часть, идущую к Земле. В настоящий момент детальное (квазиодновременное по всему фронту) исследование выбросов, наблюдаемых методом межпланетных мерцаний, практически отсутствует. Техническая возможность отслеживания выбросов в деталях будет способствовать большему пониманию как структуры выбросов, так и особенностей их распространения в межпланетной среде. Поэтому такой вариант радиотелескопа гораздо предпочтительней, чем 64-модульный. Однако время счета при поиске фазовых задержек увеличится в четыре раза.

Помимо КВМ известны также коротящие структуры, которые также могут вызывать магнитные бури. Мощность таких бурь невелика в сравнении бурями, возбужденными КВМ. Согласно наблюдениям на БСА [Chashei et al., 2023], коротящие структуры проявляются в наблюдениях обычно за двое-трое суток до прихода к Земле в виде уменьшения индекса мерцаний перед фронтом коротящей структуры и их легко регистрировать.

Мы рассмотрели идеальную схему прогнозирования, в которой не учитываются реалии. Так, гроза

или аварии электросетей приведут к тому, что прогноз космической погоды нельзя будет дать. Быстрый выброс, имеющий скорость от 1500 км/с и идущий в ночное время, нельзя отследить. На телескопах проводятся регулярные регламентные работы, которые могут занимать несколько дней. Поэтому для службы, гарантирующей прогноз космической погоды, необходимо иметь несколько радиотелескопов, находящихся на разных долготах. Выключение одного или двух телескопов, неважно по какой причине, позволит оставшимся в работе телескопам отслеживать выбросы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение индекса мерцаний межпланетных компактных радиоисточников на спокойном и возбужденном солнечном ветре позволяет оценить скорость и направление распространения КВМ, а также регистрировать коротящие структуры. Показано, что для мониторинга мерцающих источников необходим радиотелескоп с широким полем зрения и возможностью повторных наблюдений тех же источников.

Для решения прикладной задачи прогнозирования магнитных бурь на Земле предложен проект радиотелескопа для мониторинга межпланетной плазмы на базе фазированной антенной решетки, работающей в диапазоне 120–240 МГц. Показано, что помимо прикладной задачи — прогноза космической погоды — на таком телескопе можно решать научные задачи.

Идеальной антенной для прогнозирования космической погоды является 128-модульная конструкция, позволяющая выдавать прогноз минимум 4–6 раз в день, а также отслеживать возможные повторные выбросы. Прогнозирование легко осуществимо с 64-модульной конструкцией, но с очень небольшим запасом по времени при поиске новых выбросов, которые могут появиться в те же дни, что и отслеживаемый выброс. Прогнозирование с 32-модульной конструкцией телескопа все еще возможно, но запаса по времени нет, отслеживание повторных выбросов практически невозможно, сам прогноз будет делаться, вероятнее всего, 1 раз в день.

Обоснованы технические требования к радиотелескопу, определена его структурная схема и требования к функциональным элементам.

Возможно дальнейшее масштабирование радиотелескопа, в том числе с размещением его элементов в других регионах РФ, что позволит повысить точность и надежность прогноза.

Работа выполнялась в рамках госзадания. Авторы благодарят И.В. Чашея за предварительное прочтение рукописи и ряд полезных замечаний, а также Л.Б. Потапову за помощь в оформлении статьи и подготовке рисунков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воскресенский Д.И. *Устройства СВЧ и антенны (Проектирование фазированных антенных решеток)*. М.: Радио и связь, 1981, 432 с.

- Гончаренко И.В. *Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA*. М.: РадиоСофт, 2002, 80 с.
- Петрукович А.А. Солнечно-земные связи и космическая погода. *Плазменная гелиогеофизика*. М.: Наука, 2008, с. 175–257.
- Artyukh V.S., Tyul'bashev S.A. A method for analyzing a survey of scintillating radio sources. *Astronomy Reports*. 1996a, vol. 40, iss. 5, pp. 608–615.
- Artyukh V.S., Tyul'bashev S.A. The cosmological evolution of compact radio sources from 102 MHz observations. *Astronomy Reports*. 1996b, vol. 40, iss. 5, pp. 601–607.
- Artyukh V.A., Tyul'bashev S.A., Isaev E.A. The cosmological evolution of compact radio sources from 102–MHz observations. *Astronomy Reports*. 1998, vol. 42, iss. 3, pp. 576–586.
- Bisi M.M., Breen A.R., Jackson B.V., et al. From the Sun to the Earth: The 13 May 2005 coronal mass ejection. *Solar Phys*. 2010, vol. 265, iss. 1–2, pp. 49–127. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9602-8>.
- Bisi M.M., Fallows R.A., Jackson, B.V., et al. The Worldwide Interplanetary Scintillation (IPS) Stations (WIPSS) network October 2016 observing campaign: Initial WIPSS data analyses. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2017, SH21A-2648.
- Chashei I.V., Tyul'bashev S.A., Subaev I.A., Izvekova V.A. Global structure of the solar wind in a of decreasing solar activity from interplanetary-scintillation monitoring data. *Astronomy Reports*. 2019, vol. 63, iss. 2, pp. 161–165. <https://doi.org/10.1134/S1063772919020021>.
- Chashei I.V., Tyul'bashev S.A., Lukmanov V.R., Subaev I.A. ICMEs and CIRs monitored in IPS data at a frequency of 111 MHz. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 72, iss. 12, pp. 5371–5375. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.050>.
- Chen P.F. Coronal mass ejections: Models and their observational basis. *Living Rev. Sol. Phys.* 2011, vol. 8, iss. 1, pp. 1–92. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2011-1>.
- Dagkesamanskii R.D., Veselovskii A.V., Zheleznykh I.M., et al. Prototype of a meter-wavelength radio telescope with wide field-of-view. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2020, vol. 47, iss. 3, pp. 71–75. <https://doi.org/10.3103/S1068335620030021>.
- de Ruite I., Meyers Z.S., Rowlinson A., et al. Transient study using LoTSS-framework development and preliminary results. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2024, vol. 531, iss. 4, pp. 4805–4822. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae1458>.
- Dong F.A., Clarke T.E., Curtin A., et al. CHIME/fast radio burst/pulsar discovery of a nearby long-period radio transient with a timing glitch. *Astrophys. J. Lett.* 2025, vol. 990, iss. 2, pp. L49–L64. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adfa8e>.
- Fallows R.A., Iwai K., Jackson B.V., et al. Application of novel interplanetary scintillation visualisations using LO-FAR: A case study of merged CMEs from September 2017. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 72, iss. 12, pp. 5311–5327. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.076>.
- Ghughe D., Bhattacharjee D., Subramanian P. Turbulent power: A discriminator between sheaths and CMEs. *Solar Phys*. 2025, vol. 300, iss. 4, 47. <https://doi.org/10.1007/s11207-025-02457-5>.
- 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. *Astronomy Reports*. 2013, vol. 57, iss. 8, pp. 586–593. <https://doi.org/10.1134/S1063772913070020>.
- Glyantsev A.V., Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Shishov V.I. The detection of coronal mass ejections in the interplanetary medium using scintillation observations. *Astronomy Reports*. 2014, vol. 58, iss. 9, pp. 619–625. <https://doi.org/10.1134/S1063772914090030>.
- Glyantsev A.V., Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Shishov V.I. Interplanetary-scintillation observations of coronal mass ejections near the maximum of the 24<sup>th</sup> solar-activity cycle. *Astronomy Reports*. 2015, vol. 59, iss. 1, pp. 40–45. <https://doi.org/10.1134/S1063772915010047>.
- Gosling J.T., Hildner E., MacQueen R.M., et al. Mass ejections from the Sun: A view from Skylab. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, iss. 31, pp. 4581–4587. <https://doi.org/10.1029/JA079i031p04581>.
- Gosling J.T., Hildner E., MacQueen R.M., et al. The speeds of coronal mass ejection events. *Solar Phys*. 1976, vol. 48, iss. 2, pp. 389–397. <https://doi.org/10.1007/BF00152004>.
- Hewish A., Scott P.F., Wills D. Interplanetary scintillation of small diameter radio sources. *Nature*. 1964, vol. 203, iss. 4951, pp. 1214–1217. <https://doi.org/10.1038/2031214a0>.
- Hewish A., Dennison P.A., Pilkington J.D.H. Measurements of the size and motion of the irregularities in the interplanetary medium. *Nature*. 1966, vol. 209, iss. 5029, pp. 1188–1189. <https://doi.org/10.1038/2091188a0>.
- Iwai K., Shiota D., Tokumaru M., et al. Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations. *Earth, Planets and Space*. 2019, vol. 71, iss. 1, 39. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1019-5>.
- Kojima M., Tokumaru M., Watanabe H., et al. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations. 2. Latitude and heliocentric distance dependence of solar wind structure at 0.1–1 AU. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, iss. A2, pp. 1981–1990. <https://doi.org/10.1029/97JA02162>.
- Lee Y.W.J., Caleb M., Murphy T., et al. The emission of inter-pulses by a 6.45-h-period coherent radio transient. *Nature Astronomy*. 2025, vol. 9, pp. 393–405. <https://doi.org/10.1038/s41550-024-02452-z>.
- Likhachev S.F., Kostenko V.I., Girin I.A., et al. Software correlator for Radioastron mission. *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2017, vol. 6, iss. 3, 1750004–131. <https://doi.org/10.1142/S2251171717500040>.
- Lukmanov V.R., Chashei I.V., Tyul'bashev S.A. On correlation of the interplanetary scintillation level and solar wind speed. *Astronomy Reports*. 2022, vol. 66, iss. 12, pp. 1325–1328. <https://doi.org/10.1134/S1063772922110142>.
- Manoharan P.K., Ananthakrishnan S., Dryer M., et al. Solar wind velocity and normalized scintillation index from single-station IPS observations. *Solar Phys*. 1995, vol. 156, iss. 2, pp. 377–393. <https://doi.org/10.1007/BF0067023>.
- Manoharan P.K., Tokumaru M., Pick M., et al. Coronal mass ejection of 2000 July 14 flare event: Imaging from near-Sun to Earth environment. *Astrophys. J.* 2001, vol. 559, iss. 2, pp. 1180–1189. <https://doi.org/10.1086/322332>.
- Marians M. Computed scintillation spectra for strong turbulence. *Radio Sci.* 1975, vol. 10, pp. 115–119. <https://doi.org/10.1029/RS010i001p00115>.
- Mejia-Ambriz J.C., Jackson B.V., Gonzalez-Esparza J.A., et al. Remote-sensing of solar wind speeds from IPS observations at 140 and 327 MHz using MEXART and STEL. *Solar Phys*. 2015, vol. 290, iss. 9, pp. 2539–2552. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0694-z>.
- Millward G., Biesecker D., Pizzo V., de Koning C.A. An operational software tool for the analysis of coronagraph images: Determining CME parameters for input into the WSA-Enlil heliospheric model. *Space Weather*. 2013, vol. 11, iss. 2, pp. 57–68. <https://doi.org/10.1002/swe.20024>.
- Morgan J., McCauley P.I., Waszewski A., et al. Detection and characterization of a coronal mass ejection using interplanetary scintillation measurements from the Murchison Widefield Array. *Space Weather*. 2023, vol. 21, iss. 5,

- e2022SW003396.  
<https://doi.org/10.1029/2022SW003396>.
- Readhead A.C.S. Interplanetary scintillation of radio sources at metre wave-lengths – II. Theory. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 1971, vol. 155, p. 185.  
<https://doi.org/10.1093/mnras/155.2.185>.
- Romero-Hernandez E., Gonzalez-Esparza J.A., Aguilar-Rodriguez E., et al. Detection of solar wind disturbances: Mexican Array Radio Telescope IPS observations at 140 MHz. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 9, pp. 2553–2566.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0690-3>.
- Antenna Toolbox – MATLAB. Available at:  
<https://www.mathworks.com/products/antenna.html>.  
 (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
- Tingay S.J., Goeke R., Bowman J.D., et al. The Murchison Widefield Array: The square kilometre array precursor at low radio frequencies. *Publ. Astron. Soc. Australia.* 2013, vol. 30, e007, 21 p. <https://doi.org/10.1017/pasa.2012.007>.
- Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K. Solar cycle evolution of the solar wind speed distribution from 1985 to 2008. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010, vol. 115, iss. A4, A04102. <https://doi.org/10.1029/2009JA014628>.
- Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K. Long-term evolution in the global distribution of solar wind speed and density fluctuations during 1997–2009. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2012, vol. 117, iss. A6, A06108.  
<https://doi.org/10.1029/2011JA017379>.
- Tyul'bashev S.A., Golysheva P.Y., Tyul'bashev V.S., Subaev I.A. Search for long-term variability of several flat-spectrum sources at 111 MHz. *Astronomy Reports.* 2019, vol. 63, iss. 11, pp. 920–931.  
<https://doi.org/10.1134/S1063772919100068>.
- Turtle A.J., Baldwin J.E. A survey of galactic radiation at 178 Mc/s. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 1962, vol. 124, p. 459.  
<https://doi.org/10.1093/mnras/124.6.459>.
- Shishov V.I., Chashei I.V., Oreshko V.V., et al. Monitoring of the turbulent solar wind with the upgraded Large Phased Array of the Lebedev Institute of Physics: First results. *Astronomy Reports.* 2016, vol. 60, iss. 12, pp. 1067–1082.  
<https://doi.org/10.1134/S1063772916110068>.
- van Haarlem M.P., Wise M.W., Gunst A.W., et al. LOFAR: The LOw-Frequency Array. *Astron. Astrophys.* 2013, vol. 556, A2, 53 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220873>.
- Vlasov V.I. Solar-wind velocity measurement by radio observations of phenomena propagated through the interplanetary plasma. *Soviet Astronomy Letters.* 1979, vol. 5, pp. 154–156.
- Vlasov V.I., Chashei I.V., Shishov V.I., Shishova T.D. Interplanetary plasma from radioastronomical data (Review). *Geomagnetism and Aeronomy.* 1979, vol. 19, pp. 269–282.
- Wagner W.J. SERF studies of mass motions arising in flares. *Adv. Space Res.* 1982, vol. 2, iss. 11, pp. 203–219.  
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(82\)90201-0](https://doi.org/10.1016/0273-1177(82)90201-0).
- Wang Y.M., Sheeley N.R., Socker D.G., et al. Observations of correlated white-light and extreme-ultraviolet jets from polar coronal holes. *Astrophys. J.* 1998, vol. 508, iss. 2, pp. 899–907. <https://doi.org/10.1086/306450>.
- Waszewski A., Morgan J.S., Chhetri R., et al. Resolving moving heliospheric structures using interplanetary scintillation observations with the Murchison Widefield Array. *Space Weather.* 2023, vol. 21, iss. 10, e2023SW003570.  
<https://doi.org/10.1029/2023SW003570>.
- Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., et al. A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2004, vol. 109, iss. A7, A07105. <https://doi.org/10.1029/2003JA010282>.  
 URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://iszf.irk.ru/megascience/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <http://ipg.geospace.ru/space-weather-forecast.html> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: [www.swpc.noaa.gov](http://www.swpc.noaa.gov) (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: [wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp) (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <http://www.cessi.in/spaceweather/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://swe.ssa.esa.int/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: [http://www.spaceweather.org/ISES/rwc/rwc\\_cn\\_a.html](http://www.spaceweather.org/ISES/rwc/rwc_cn_a.html) (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/WSA-Enlil-at-SWPC~3/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/dscovr-deep-space-climate-observatory> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/ace-real-time-solar-wind> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://www.mathworks.com/products/antenna.html> (дата обращения 25 октября 2025 г.).  
 URL: <https://sw.prao.ru/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Орешко В.В., Тюльбашев С.А. Радиотелескоп для мониторинга состояния межпланетной плазмы. *Солнечно-земная физика.* 2026, т. 12, № 2, с. 105–118. <https://doi.org/10.12737/szf-122202611>.