

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.272.5

**РАДИОМЕТР ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ  
НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 10.7 см**

**©2026 г. Ю. В. Векшин\*, М. Б. Зотов\*\*, А. С. Лавров,  
Е. Ю. Хвостов**

*Институт прикладной астрономии Российской академии наук*

*Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10*

*\*e-mail: yv.vekshin@iaaras.ru*

*\*\*e-mail: zmb@iaaras.ru*

Поступила в редакцию 27.11.2025 г.

После доработки 03.12.2025 г.

Принята к публикации 14.01.2026 г.

Разработан радиометр для мониторинга солнечной активности на длине волны 10.7 см для прогнозирования состояния околоземного космического пространства. Радиометр позволяет в автоматическом режиме производить калибровку, измерение, визуализацию и регистрацию интенсивности и поляризации солнечного радиоизлучения. Рассмотрен принцип действия приемной системы и системы регистрации радиометра, описано программное обеспечение для управления системами. Приведены результаты измерений характеристик радиометра и его составных частей. Предложены и реализованы методы повышения чувствительности и стабильности радиометра.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Интегральный поток излучения Солнца на длине волны 10.7 см является наиболее объективной оценкой текущего уровня солнечной активности и ее изменчивости на протяжении нескольких солнечных циклов. Индекс 10.7 см используется в качестве входного параметра при расчетах в различных моделях околоземной среды – магнитосферы и ионосферы [1]. Достоинством мониторинга солнечной активности в радиодиапазоне является его всепогодность, так как атмосферные условия слабо влияют на принимаемый сигнал.

На данный момент информация об индексе  $F_{10.7}$  берется, в основном, из открытых источников. Наиболее точные данные публикуются по результатам наблюдений на радиотелескопе обсерватории Доминиона в Пентиктоне (Канада) [2]. Важно подчеркнуть, что эти данные публикуются добровольно, и в любой момент времени доступ к ним может

быть ограничен. Таким образом, с целью обеспечения непрерывности анализа и прогнозирования состояния околоземной среды необходимо иметь собственную службу Солнца в Российской Федерации [3].

В Уссурийской астрофизической обсерватории с 1970 года проводятся патрульные наблюдения Солнца в радиодиапазоне. Аппаратура радиотелескопа РТ-2 [4] была произведена более 30 лет назад и к настоящему времени устарела.

Кроме того, для изучения физики процессов, происходящих на Солнце, необходимо измерение не только интенсивности, но и поляризации солнечного радиоизлучения.

В 2020 году было принято решение начать разработку поляриметра-радиометра для нового солнечного радиотелескопа с диаметром зеркала 1.8 м. Накопленный опыт Уссурийской астрофизической обсерватории позволил сформулировать следующие требования к радиометру: чувствительность не хуже 1 К при времени накопления 1 с на длине волны 10.7 см, динамический диапазон не менее 30 дБ для измерения солнечных вспышек. При этом в составе радиометра должны быть предусмотрены устройство для проведения оперативной калибровки приемного тракта и контроля идентичности каналов разной поляризации, возможность автоматизированного и удаленного управления радиометром, а также запись и передача наблюдаемых данных.

В 2022 году в ИПА РАН завершена разработка нового радиометра для мониторинга солнечной активности, и в конце 2022 года он был установлен на радиотелескоп РТ-1.8 [5] в Уссурийской астрофизической обсерватории.

В настоящей статье рассмотрен принцип действия радиометра и приведены его основные характеристики. Радиометр состоит из приемной системы и системы регистрации.

## 2. ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА

Приемная система (ПС) обеспечивает прием, усиление и выделение рабочей полосы солнечного радиоизлучения. Приемная система, включая облучатель, размещается в герметичном фокальном контейнере (рис. 1), который устанавливается в первичный фокус главного зеркала.

**Рис. 1.** Приемная система в фокальном контейнере

Облучатель (рис. 2) представляет собой скалярный рупор, работающий в полосе частот 2785–2815 МГц на правой и левой круговых поляризациях. Облучатель предназначен для антенн с отношением  $F/D$  в пределах 0.36–0.40, имеющих угол облучения рефлектора  $\pm(65-70)^\circ$ . Диаметр облучателя равен 199 мм, а его длина составляет 248 мм. Уровень диаграммы направленности (ДН) облучателя (рис. 2) в направлении кромок рефлектора антенны равен примерно  $-15$  дБ, что оптимально для радиоастрономических антенн. Уровень боковых лепестков и кросс-поляризационной ДН не превышает  $-22$  дБ.

Коэффициент стоячей волны по напряжению выходных портов в рабочей полосе частот не превышает 1.2, развязка между портами более 20 дБ.

**Рис. 2.** Облучатель и его диаграмма направленности

Для измерения степени поляризации солнечного радиоизлучения в приемной системе осуществляется переключение между выходами сигналов правой и левой поляризации облучателя с помощью р-і-п-переключателя Mini-Circuits ZSDR-230+, что позволяет использовать один усилительный тракт для обоих поляризационных каналов (плечей). Система управления двухканального р-і-п-переключателя (SPDT) обеспечивает 4 режима работы, при которых можно произвольно закрывать и открывать плечи – как вместе, так и по отдельности, что позволяет реализовать такие режимы, как сумма сигналов и полное закрытие (сигнал от облучателя отражается от переключателя).

Функциональная схема ПС представлена на рис. 3. На выходах облучателя установлены СВЧ-вентили, обеспечивающие согласование. Стандартный цикл работы ПС включает в себя 4 такта. На вход малошумящего усилителя МАНW001040-03 производства НПФ “Микран” поочередно поступают сигнал, соответствующий правой круговой поляризации (RCP), сигнал, соответствующий левой круговой поляризации (LCP), и их сумма (RCP+LCP). В четвертый такт поступает калибровочный сигнал от генератора шума (ГШ), вводимый через направленный ответвитель, при этом сигналы с облучателя блокируются полным закрытием переключателя. Генератор шума М41318 производства НПП “Исток”, работающий на лавинно-пролетном диоде, используется для абсолютной калибровки приемника, а также как эталонный источник шума для реализации модуляционного радиометра. В модуляционном режиме работы для уменьшения влияния нестабильности коэффициента усиления радиометра при дальнейшей обработке вычисляются разности выходных сигналов приемника от антенны и от генератора шума.

**Рис. 3.** Функциональная схема радиометра

В схеме ПС предусмотрено управление уровнем генератора шума, которое осуществляется с помощью перестраиваемого аттенюатора. Для формирования полосы сигнала используются сборки фильтров нижних и верхних частот разработки ИПА РАН. Полоса пропускания фильтров по уровню –3 дБ составляет 2.72–2.87 ГГц. Ослабление на частоте 2.6 ГГц составляет более 40 дБ, что позволяет отсечь помехи от связи стандарта 4GLTE и не допустить перегрузки системы регистрации. Термостабилизация предусмотрена только для генератора шума как наиболее чувствительного элемента приемной системы. Источники питания для системы термостабилизации и исполнительная схема размещаются вне фокального контейнера. Основные характеристики приемной системы представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные характеристики приемной системы

Параметр	Значение
Коэффициент усиления, дБ	28.5
Шумовая температура, К	450
Точка 1-дБ компрессии по входу, дБм	-14.5
Точка 1-дБ компрессии по выходу, дБм	16

Плата управления и питания предназначена для электропитания узлов приемной системы, распределения модуляции, а также для дистанционного управления всеми функциями аппаратуры приемной системы и контроля основных параметров их работы с целью диагностики неисправностей. В частности, функционал системы управления включает в себя:

- контроль потребляемого тока и напряжений питания малошумящих усилителей;
- управление и контроль состояния управляемых аттенуаторов;
- управление и контроль состояния р-і-п-переключателя;
- управление режимами работы приемной системы, в том числе ГШ;
- контроль питания ГШ;
- контроль температуры (облучателя, усилительного тракта, ГШ и интерфейсного фланца);
- контроль температуры и влажности окружающей среды.

Управление ПС осуществляется по интерфейсу Ethernet 10/100 от компьютера оператора с помощью программы управления приемной системой солнечного радиотелескопа. Вид интерфейса пользователя указанной программы представлен на рис. 4.

**Рис. 4.** Интерфейс пользователя программы управления приемной системой

### 3. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Система регистрации обеспечивает преобразование СВЧ-сигналов от приемной системы в поток цифровых данных. Для измерения солнечных вспышек радиометр должен иметь широкий динамический диапазон [6], более 30 дБ. В качестве системы регистрации для солнечного радиометра удобно использовать программно-определяемую радиосистему SDR [7]. В данной работе было использовано программно-определяемое устройство фирмы National Instruments USRP-2922, обеспечивающее широкополосную обработку сигналов (полоса составляет 25 МГц) в широком динамическом диапазоне. Программно-определяемое устройство выполняет также функцию генерации тактового сигнала для управления переключателем. Управление и сбор данных осуществляются по интерфейсу Ethernet.

Сигнал от приемной системы подается на вход приемного канала Rx устройства USRP [8], усиливается с регулируемым коэффициентом усиления и преобразуется в область нулевых частот с помощью квадратурного демодулятора с перестраиваемым гетеродином (настроенным на частоту 2800 МГц). Далее I/Q-компоненты сигнала оцифровываются с частотой 25 Мвыб/с и разрешением 16 бит в режиме реального времени. Цифровой поток данных передается по интерфейсу 1 Gb Ethernet на компьютер, где данные обрабатываются, визуализируются и записываются в файл с помощью разработанной программы регистрации. Интерфейс пользователя разработанной программы регистрации данных представлен на рис. 5.

**Рис. 5.** Интерфейс пользователя программы регистрации данных радиометра

В программе регистрации вычисляется спектр сигнала, оцифрованного с частотой 25 Мвыб/с, проводится цифровая фильтрация помех, осуществляется синхронное детектирование сигналов при разных положениях переключателя (ГШ, RCP, LCP, RCP+LCP) длительностью 1 мс для каждого положения переключения, полный период цикла составляет 4 мс. Данные накапливаются отдельно для каждого канала в пределах интервала 0.1 с (время накопления одного канала 25 мс). В файл записываются как значения измеренных сигналов ГШ, RCP, LCP, физической суммы поляризацій (при открытии двух р-і-п-диодов модулятора), так и вычисленные в реальном времени значения математической суммы поляризации (полная интенсивность излучения), разность интенсивности и ГШ (реализуется модуляционный радиометр), а также разность поляризацій. На экран пользователя (рис. 5) выводятся 4 графика: сигнал ГШ, интенсивность излучения в режиме полной мощности, интенсивность излучения в модуляционном режиме, разность поляризацій (параметр Стокса V). Время усреднения сигнала может быть выбрано пользователем кратным 0.1 с.

Для синхронизации переключателя в приемной системе и системе регистрации используется канал передатчика Tx USRP [8] для формирования цифровых сообщений (длительностью 80 мкс и периодом 1 кГц) для системы управления, управляющей положением переключателя. Сигнал выводится после цифро-аналогового преобразователя перед смесителем, далее он подается на операционный усилитель, дополнительно установленный в USRP (рис. 6), и передается по кабелю на систему управления приемником.

**Рис. 6.** Система регистрации в экранированном корпусе (без крышки)

Для устранения влияния гетеродина USRP-2922 на приемную систему регистрации мы разместили ее в экранированном корпусе (рис. 6) в подзеркальном пространстве радиотелескопа. Также гармоника гетеродина исключается программно путем приравнивания мощности нулю на участке спектра шириной 1.5 МГц, содержащего гармонику.

Коэффициент усиления  $G_{\text{рег}}$  усилителя в системе регистрации задается в программе регистрации оператором и может изменяться в пределах от нуля до 31.5 дБ. Основные характеристики системы регистрации при минимальном и максимальном коэффициентах усиления представлены в табл. 2. Шумовая температура системы регистрации составляет  $T_{\text{рег}} = 623$  К при  $G_{\text{рег}} = 31.5$  дБ, тогда при коэффициенте усиления приемника  $G_{\text{пр}} = 28.5$  дБ и шумовой температуре  $T_{\text{пр}} = 450$  К (см. таблицу 1) вклад  $T_{\text{рег}}$ , пересчитанный на вход приемника составляет не более 1 К.

**Таблица 2.** Основные характеристики системы регистрации

Параметр	Значение	
	$G_{\text{рег}} = 0$	$G_{\text{рег}} = 31.5$ дБ
Ширина полосы частот, МГц	25	
Разрядность АЦП, бит	16	
Коэффициент усиления, дБ	10	41.5
Шумовая температура, К	$250 \cdot 10^3$	623
Точка 1-дБ компрессии по входу, дБм	0	-31.5
Точка 1-дБ компрессии по выходу, дБм	10	10
Динамический диапазон, дБ	72	64

#### 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОМЕТРА

Приемная система и система регистрации были собраны вместе и образовали радиометр.

Для измерения амплитудно-частотной и передаточной характеристик радиометра на вход переключателя приемной системы (до подключения облучателя) подавался сигнал от генератора сигналов. Измерялись уровни сигналов на выходе системы регистрации при изменении частоты и мощности генератора в автоматическом режиме. На рис. 7 представлены амплитудно-частотная характеристика радиометра при заданном коэффициенте усиления системы регистрации  $G_{\text{рег}} = 31.5$  дБ и передаточная характеристика при  $G_{\text{рег}} = 0$ .

**Рис. 7.** Амплитудно-частотная характеристика (а) и передаточная характеристика радиометра (б)

Шумовая температура радиометра вместе с подключенным облучателем измерялась методом двух отсчетов. На вход облучателя устанавливалась широкоапертурная согласованная нагрузка, представляющая собой радиопоглощающий материал, помещенный в емкость для заполнения жидким азотом. Уровни выходных сигналов радиометра измерялись при “теплой” и “холодной” нагрузках на входе облучателя.

В табл. 3 сведены основные характеристики радиометра при минимальном и максимальном коэффициентах усиления системы регистрации. Полоса частот радиометра  $\Delta f$  определяется шириной полосы частот системы регистрации и по уровню  $-3$  дБ составляет 2789–2811 МГц (рис. 7), временное разрешение  $t = 0.1$  с. Максимальный коэффициент усиления радиометра  $G_{\text{рад}}$  составляет 70 дБ, при нем достигаются наименьшая шумовая температура радиометра  $T_{\text{рад}} = 450$  К и динамический диапазон 39 дБ. При минимальном усилении радиометра  $G_{\text{рад}} = 38.5$  дБ достигается наибольший динамический диапазон 67 дБ, однако шумовая температура возрастает из-за роста вклада шума системы регистрации. Для измерения солнечных вспышек достигается требуемый динамический диапазон радиометра более 30 дБ.

**Таблица 3.** Основные характеристики радиометра

Параметр	Значение	
	$G_{\text{рег}} = 0$	$G_{\text{рег}} = 31.5$ дБ
Полоса частот, МГц	2789–2811	
Временное разрешение, с	0.1	
Коэффициент усиления, дБ	38.5	70
Шумовая температура, К	850	450
Чувствительность, К	0.85	0.45
Точка 1-дБ компрессии по входу, дБм	-28.5	-60
Точка 1-дБ компрессии по выходу, дБм	10	10
Минимальная мощность по входу, дБм	-96	-99
Минимальная мощность по выходу, дБм	-57	-29
Динамический диапазон, дБ	67	39

Чувствительность  $\Delta T$  радиометра [9] по измерению полной интенсивности солнечного радиоизлучения  $T_C$  определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{T_{\text{рад}} + T_C}{\sqrt{2 \Delta f \tau}}.$$

Время усреднения каждого из четырех тактов модуляции составляет  $\tau = 0.025$  с. При сложении шумовых сигналов правой и левой поляризаций в  $\sqrt{2}$  раз увеличивается среднеквадратичное отклонение шума и в 2 раза увеличивается полезный сигнал, поэтому чувствительность полной интенсивности в  $\sqrt{2}$  раз лучше, чем канала одной поляризации. Чувствительность радиометра при отсутствии излучения Солнца в режиме полной мощности при временном разрешении 0.1 с составляет 0.45 К. На радиотелескопе РТ-1.8 при наведении на Солнце минимальная шумовая температура системы составляет 1000 К, а чувствительность 1 К.

В модуляционном режиме из сигнала полной интенсивности от антенны вычитается сигнал генератора шума, пропускаемый через тот же тракт радиометра. Это позволяет исключить нестабильность коэффициента усиления радиометра, при этом уровни сигналов ГШ и антенны должны иметь одинаковые уровни мощности на выходе ПС. Регулировка достигается подстройкой уровня сигнала ГШ в программе регистрации в автоматическом режиме. Кроме того, в программе регистрации предусмотрена автоматическая калибровка радиометра – привязка мощности сигнала к шкале кельвина по сигналу ГШ, заранее измеренному при определенном значении аттенюатора. Чувствительность радиометра в модуляционном режиме при отсутствии излучения Солнца при временном разрешении 0.1 с составляет 0.8 К.

Для повышения чувствительности радиометра авторы предложили метод цифровой фильтрации опорного сигнала генератора шума перед компенсацией сигнала антенны в модуляционном режиме. На рис. 8 представлен расчет спектральной плотности мощности сигнала ГШ с периодом 0.1 с для интервала времени измерений 25000 с на радиотелескопе РТ-1.8. На графике 1 (рис. 8) видно, что на частотах выше 0.01 Гц (за время, меньшее 100 с) в сигнале преобладает белый шум, который можно отфильтровать (усреднить) без потерь информации об изменении коэффициента передачи радиометра, поэтому сигнал ГШ предварительно пропускается через цифровой фильтр нижних частот с частотой среза 0.01 Гц. Спектральной плотности мощности полученного отфильтрованного сигнала ГШ представлена на графике 2 (рис. 8). Такая обработка позволяет снизить флуктуации итогового разностного сигнала антенны и ГШ на коротких временных интервалах, при этом длительные флуктуации коэффициента усиления приемника отслеживаются с помощью ГШ.

**Рис. 8.** Спектральная плотность мощности сигнала генератора шума,

На рис. 9 представлены расчеты отклонения Аллана [10, 11] выходного сигнала радиометра при направлении радиотелескопа РТ-1.8 на небо в режиме полной мощности, модуляционном режиме и в модуляционном режиме с фильтрацией ГШ. Как видно на рис. 9, на интервалах усреднения до 30 с чувствительность в режиме с фильтрацией ГШ такая же, как в режиме полной мощности, а на интервалах усреднения более 30 с такая же, как в модуляционном режиме. Таким образом, на всех временных интервалах модуляционный режим с цифровой фильтрацией сигнала ГШ показывает лучшую чувствительность. Чувствительность в модуляционном режиме с фильтрацией сигнала ГШ при разрешении 0.1 с составляет 0.45 К, что в 1.7 раза лучше чувствительности в обычном модуляционном режиме без фильтрации.

**Рис. 9.** Отклонение Аллана выходного сигнала радиометра...

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан радиометр для мониторинга солнечной активности в радиодиапазоне на длине волны 10.7 см. В конце 2022 года радиометр установлен на радиотелескоп РТ-1.8 в Уссурийской астрофизической обсерватории. С начала 2023 года по настоящее время с помощью созданного радиометра проводятся ежедневные наблюдения Солнца с публикацией актуальных данных результатов наблюдений.

Радиометр позволяет измерять интенсивность и разность поляризаций солнечного радиоизлучения в автоматическом режиме. Чувствительность радиометра при временном разрешении 0.1 с составляет 0.45 К при наведении радиотелескопа РТ-1.8 на небо и 1 К при наведении на Солнце. Это дает возможность измерять поток излучения Солнца, меняющийся в течение года в пределах 100–300 солнечных единиц потока (с.е.п.) [2], с чувствительностью от 0.2 с.е.п. Разработанный метод измерений в модуляционном режиме с цифровой фильтрацией сигнала генератора шума позволяет получить такую же высокую чувствительность, как у радиометра полной мощности, на коротких интервалах времени измерения и высокую стабильность на длительных временных интервалах, как у модуляционного радиометра.

Преимуществом разработанного радиометра по сравнению с канадским [12] и корейским [6] аналогами является возможность измерения не только интенсивности, но и поляризации, а также спектров солнечного радиоизлучения в полосе 25 МГц за счет применения цифровой регистрации сигнала с высокой скоростью 25 Мвыб/с.

Созданный радиометр для мониторинга солнечной активности будет содействовать прогнозированию вспышек и оперативному предупреждению пользователей о солнечных вспышках отечественными средствами независимо от зарубежных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3 № 1. С. 3. <http://doi.org/10.12737/24347>
2. Space Weather Canada. Solar radio flux.  
<https://spaceweather.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php>
3. Богод В.М., Стороженко А.А., Тлатов А.Г. и др. // Космические исследования. 2021. Т. 59. № 2. С. 102. <http://doi.org/10.31857/S0023420621020023>.
4. Кузьменко И.В., Михалина Ф.А., Капустин Б.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. LI. № 12. С. 1005. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11839178>
5. Зотов М.Б., Быков В.Ю., Векишин Ю.В. и др. // Труды ИПА РАН. 2022. №. 61. С. 38. <http://doi.org/10.32876/ApplAstron.61.38-43>.

6. *Yun Y., Park Y.-S., Kim C.-H. et al.* // J. Korean Astron. Soc. 2014. V. 47. P. 201. <http://doi.org/10.5303/JKAS.2014.47.6.201>.
7. *Иванов Е.Ф., Губин А.В., Лесовой С.В., Эстрада Р.-С.* // Солнечно-земная физика. 2019. № 4. С. 26. <http://doi.org/10.12737/szf-54201903>.
8. USRP-2922 Features  
<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2922-feature/page/block-diagram.html>
9. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. Москва: Наука, 1973.
10. *Riley W.J.* Handbook of Frequency Stability Analysis. NIST Special Publication 1065, 2008.
11. *Vekshin Yu.V., Lavrov A.P.* // Lecture Notes in Computer Science. 2016. V. 9870. P. 648. [http://doi.org/10.1007/978-3-319-46301-8\\_56](http://doi.org/10.1007/978-3-319-46301-8_56).
12. *Tapping K.F.* // Space Weather. 2013. V. 11. № 7. P. 394. <http://doi.org/10.1002/swe.20064>.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

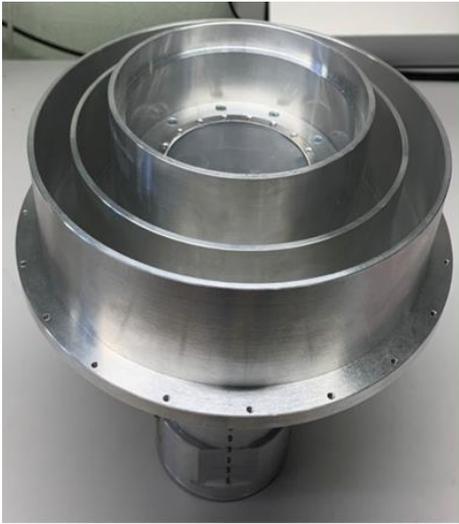
- Рис. 1.** Приемная система в фокальном контейнере: **а** – вид со стороны сборки фильтров, **б** – вид со стороны р–і–п-переключателя и малошумящего усилителя.
- Рис. 2.** Облучатель (**а**) и его диаграмма направленности (**б**).
- Рис. 3.** Функциональная схема радиометра.
- Рис. 4.** Интерфейс пользователя программы управления приемной системой.
- Рис. 5.** Интерфейс пользователя программы регистрации данных радиометра. На графиках сверху вниз представлены: сигнал от генератора шума, интенсивность излучения в режиме полной мощности, интенсивность излучения в модуляционном режиме, разность поляризаций излучения.
- Рис. 6.** Система регистрации в экранированном корпусе (без крышки).
- Рис. 7.** Амплитудно-частотная характеристика (**а**) и передаточная характеристика радиометра (**б**).
- Рис. 8.** Спектральная плотность мощности сигнала генератора шума, зарегистрированного с периодом 0.1 с на интервале 10000 с: 1 – без фильтрации, 2 – с фильтрацией.
- Рис. 9.** Отклонение Аллана выходного сигнала радиометра в разных режимах: 1 – режим полной мощности, 2 – модуляционный режим, 3 – модуляционный режим с фильтрацией сигнала генератора шума.



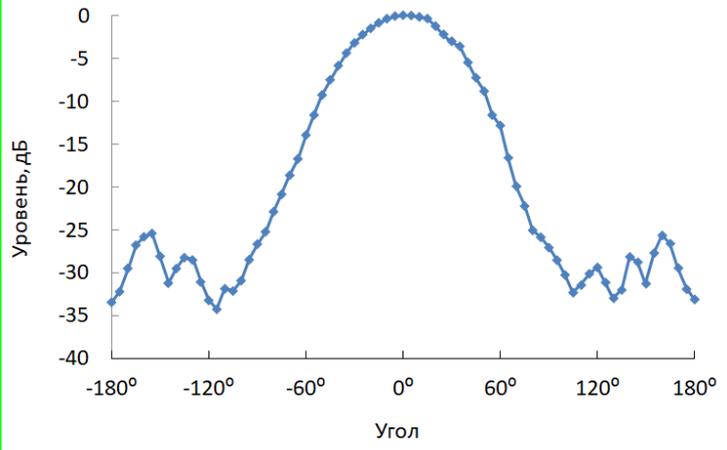
(a)

(б)

**Рис.1.**

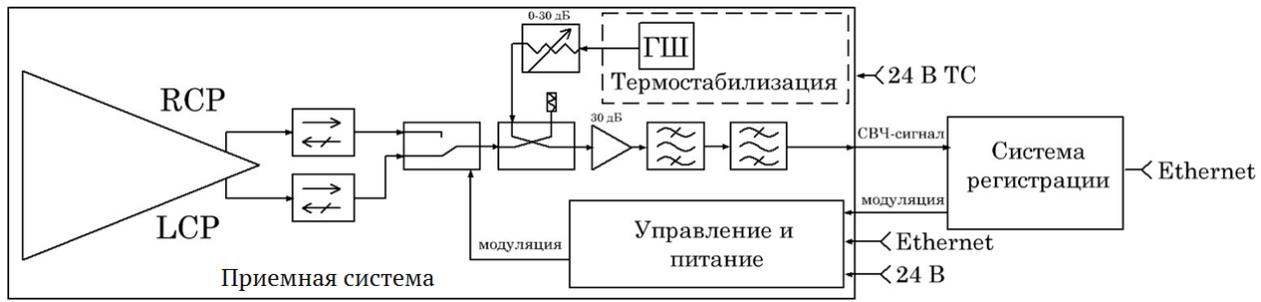


(a)



(б)

**Рис.2.**



**Рис. 3.**

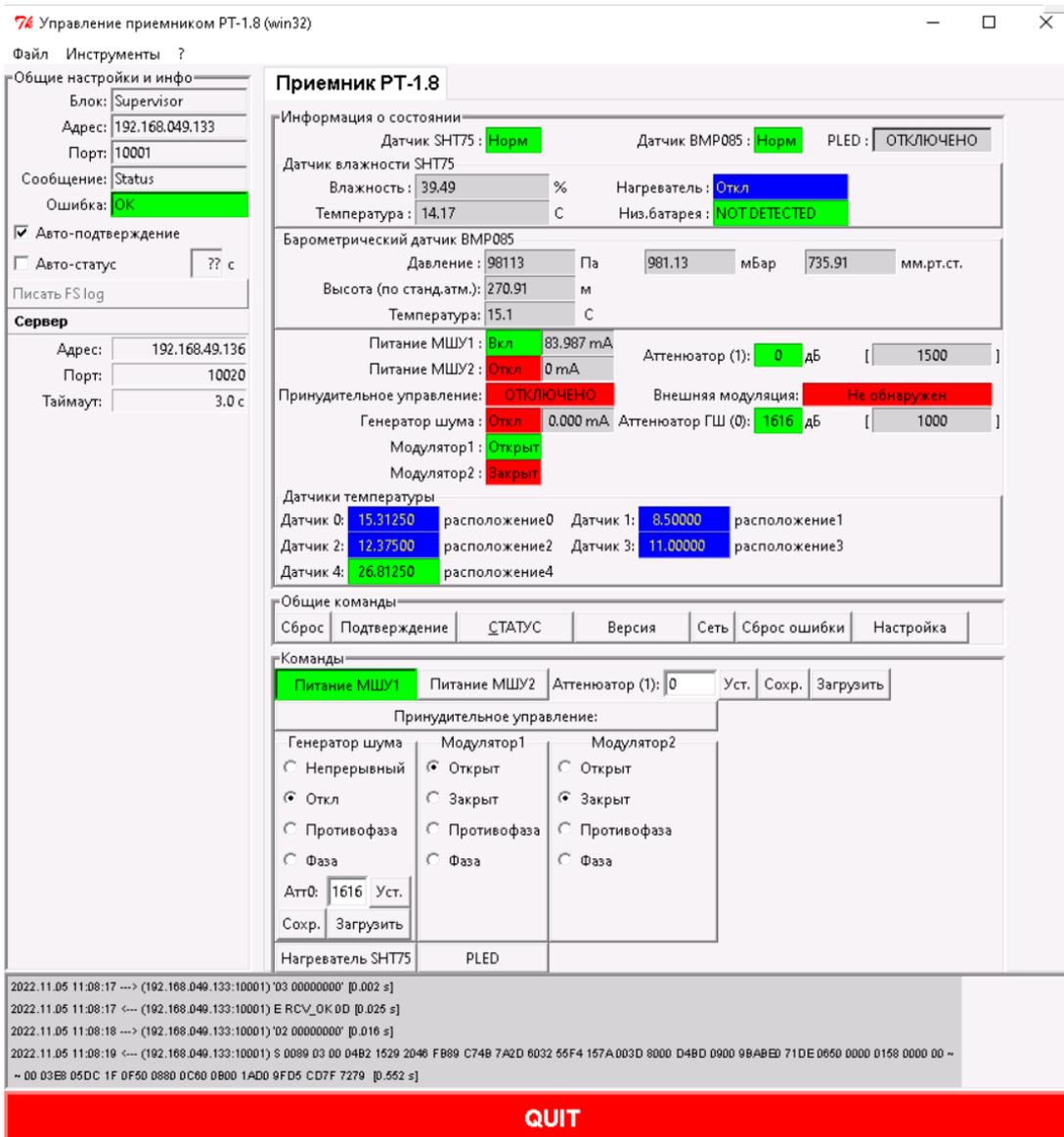


Рис. 4.

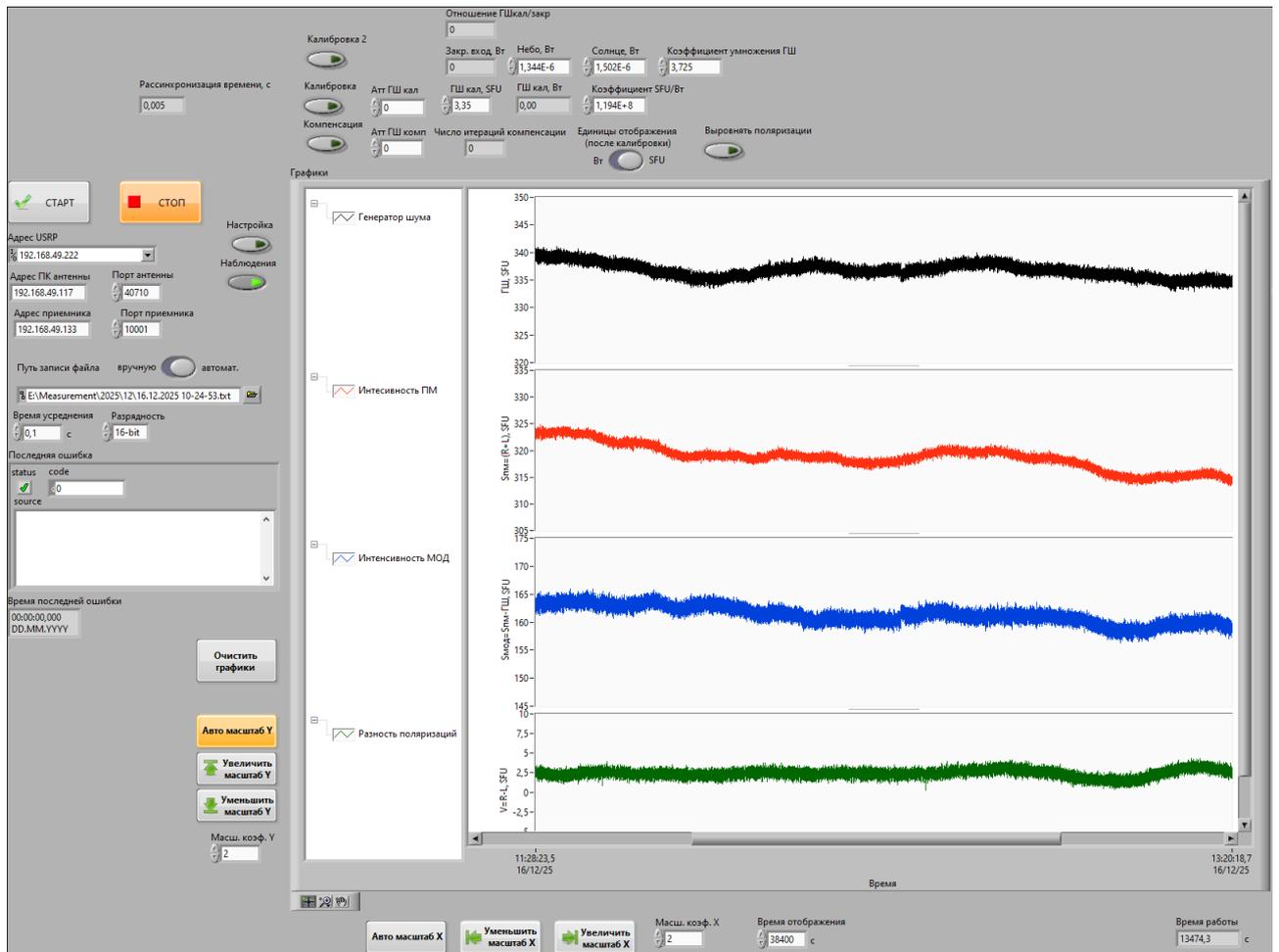
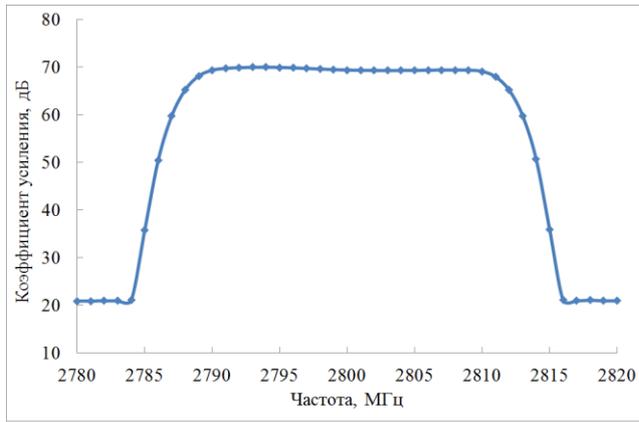


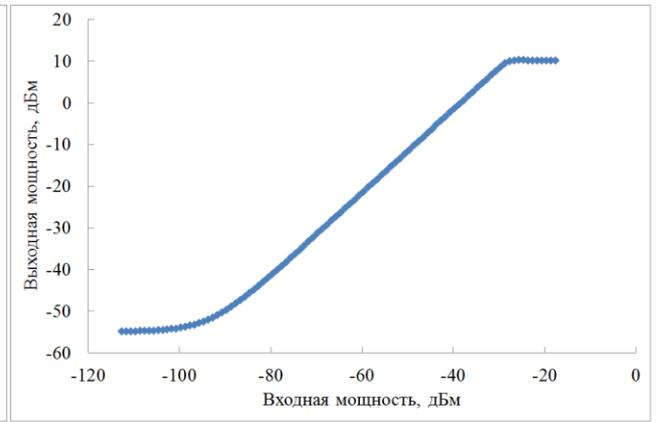
Рис. 5.



**Рис. 6.**

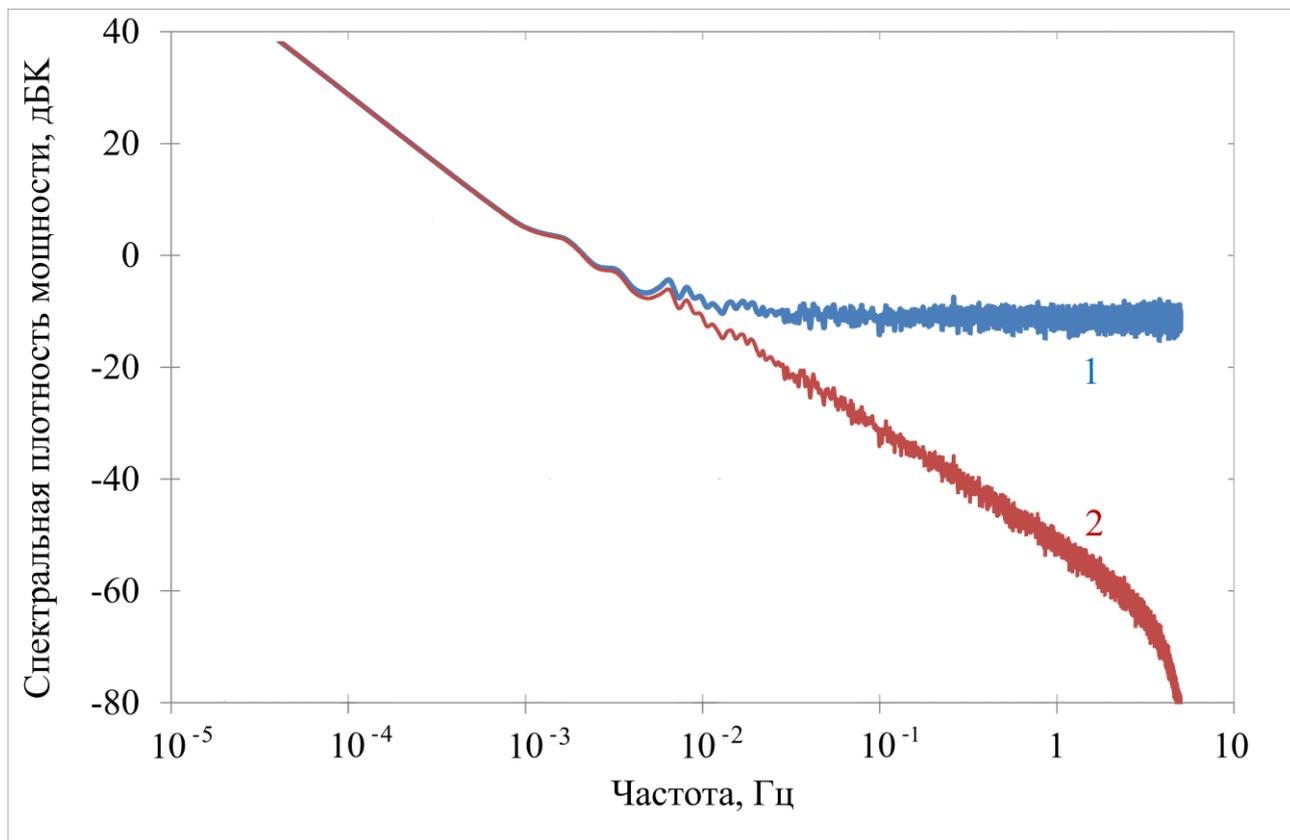


(a)



(б)

Рис. 7.



**Рис. 8.**

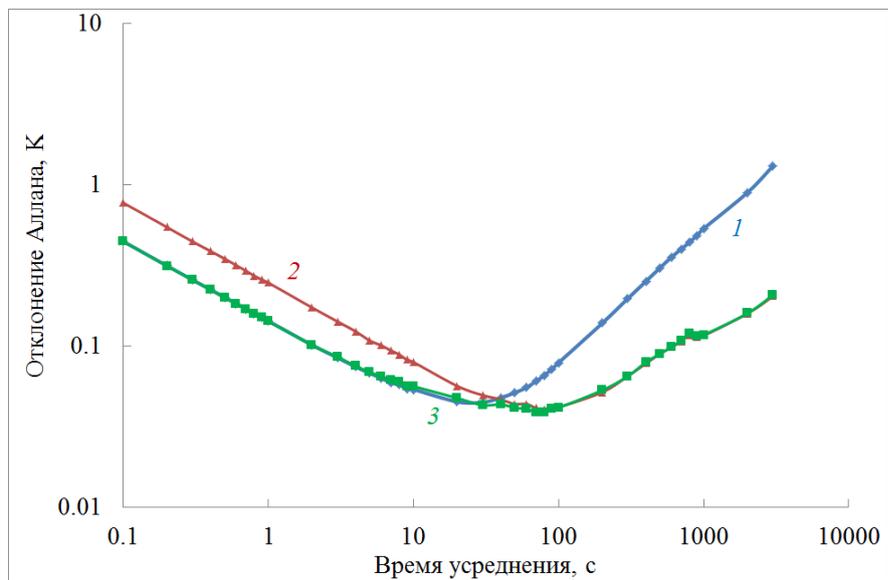


Рис. 9.