

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 53.08, 529.9-7, 551.510.5



Сетов Артём Геннадьевич

**Разработка методов калибровки и оценки чувствительности радаров некогерентного
рассеяния**

Специальность 1.3.4 «Радиофизика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Медведев Андрей Всеволодович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Виноградов Александр Георгиевич, кандидат физико-математических наук, начальник Теоретического отдела, Акционерное общество «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца» (АО НПОДАР).

Сажин Виктор Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», кафедра радиофизики и радиоэлектроники.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва.

Защита диссертации состоится «___»_____ 2026 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://ru.iszf.irk.ru> и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «___»_____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Ю.В. Ясюкевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Задачи исследования солнечно-земных связей требуют широкого спектра радиофизических инструментов, позволяющих изучать процессы, происходящие на Солнце, в межпланетном пространстве и околоземном космическом пространстве. Антенны радиометров, радиотелескопов, риометров, ионозондов, радаров и прочих инструментов, несмотря на разницу в назначении, обладают схожими принципами работы. Благодаря этому некоторые инструменты могут использоваться для решения широкого круга задач. Так, радары некогерентного рассеяния (НР), основное назначение которых состоит в исследовании ионосферы, как правило, обладают большой антенной, высокой мощностью излучения и чувствительностью к слабым сигналам, что позволяет использовать их для отслеживания космических объектов, радиозондирования поверхностей небесных тел, радиоастрономических наблюдений за мощными радиоисточниками, а также для изучения нижней и средней атмосферы методами мезосферно-стратосферно-тропосферных радаров (МСТ). В [McCrea et al., 2015] например, детально расписано множество научных задач, не ограниченное ионосферой, для радара EISCAT-3D — нового радара НР, завершение строительства которого ожидается в 2025 г. В рамках создания Национального гелиогеофизического комплекса (НГК) [Жеребцов, 2020] планируется строительство российского радара НР-МСТ, возможности которого также охватывают весь спектр перечисленных исследований.

Для получения достоверных измерений и исследования физических процессов необходимо иметь четкое понимание того, как радары взаимодействуют со средой, какую погрешность вносят и каковы предельные значения измеряемых параметров, т. е. нужна модель передаваемых и принимаемых сигналов. В составлении подобной модели важным шагом является калибровка, которой, на примере Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) [Medvedev, Potekhin, 2019], во многом и посвящена диссертация. Калибровкой называют комплекс мер для определения соответствия между показаниями измерительного прибора и истинными значениями измеряемой величины. Для радаров НР — системы передатчиков, приемников и антенно-фидерных устройств — калибровка является широким понятием и может затрагивать калибровку интенсивности сигнала, фазочастотной характеристики, диаграммы направленности (ДН) [Лебедев, 2015; Renkwitz et al., 2012]. Здесь рассматриваются абсолютная калибровка и абсолютные измерения, т. е. получение значений некоторой физической величины, (принятой мощности, плотности потока мощности излучения) в физических единицах [Вт, Ян]. Для этого определяются характеристики приема-передающей системы путем сравнения сигналов, полученных от эталонных источников. В ходе абсолютной

калибровки принятой мощности определяется уровень шума в приемном тракте, что важно для понимания природы принятых сигналов. Информация о мощности принятого сигнала открывает для радара дополнительные возможности измерения физических параметров. Примерами служат методы оценки электронной концентрации [Evans, 1969], эффективной площади рассеяния (ЭПР) космических объектов [Wang et al., 2022] и турбулентных слоев [Swarnalingam et al., 2009], скорости диссипации турбулентной энергии [Hocking, 1985], потока излучения радиоисточников [Baars, 2014] и солнечного потока [Tanaka et al., 1973].

Иркутский радар некогерентного рассеяния имеет относительно редкий частотный диапазон 154–163 МГц, представляющий интерес не только для ионосферных наблюдений, но и радиоастрономических наблюдений Солнца. Солнечное излучение в метровом диапазоне длин волн приходит из короны и в качестве инструментов для его изучения используются спектрополяриметры, а также малочисленные радиотелескопы и радиоспектрографы. Хотя ИРНР и не охватывает такой же широкий частотный диапазон, как спектрополяриметры, он обладает высокой чувствительностью благодаря крупной антенне и большим динамическим диапазоном, что дает возможность оценки солнечного потока с высоким временным разрешением. Это позволяет исследовать тонкую структуру радиовсплесков — усилений интенсивности радиоизлучения, которые генерируются в активных областях на Солнце. Кроме того, получение калиброванного солнечного потока позволяет проводить сравнение с измерениями на других инструментах для изучения солнечного радиоизлучения в широком спектре.

С абсолютной калибровкой и шумом близко связана и другая характеристика приемника — чувствительность, определяемая как минимальный уровень мощности сигнала, необходимый для проведения измерения с достаточной статистической точностью. Чувствительность часто используется как сравнительная метрика эффективности приемных антенных устройств, таких как радиотелескопы. Для сравнения радаров, однако, нужна метрика, которая учитывает излучающие возможности инструмента, поэтому дополнительно применяется понятие энергетического потенциала как произведения импульсной мощности на площадь антенны. Как чувствительность, так и энергетический потенциал — это простые, грубые оценки эффективности, иногда недостаточные для описания и проектирования исследовательских установок. С другой стороны, существуют обобщенные методы анализа [Lehtinen, 1986; Van Trees, 2013], основанные на статистической теории оценки параметров сигнала на фоне шума. В диссертации представлен более практичный метод оценки диагностического потенциала радаров НР и МСТ. Эта задача возникла во время проектирования радара НР-МСТ и обусловлена отсутствием устоявшихся методов. Создание подобных инструментов требует грамотного формулирования научных и технических задач, а также поиска компромиссных решений между стоимостью и предполагаемыми диагностическими возмож-

ностями.

Настоящая работа затрагивает некоторые аспекты калибровки, анализа шумовой обстановки, оценки физических параметров и диагностического потенциала радаров, применяемых для современных исследований в солнечно-земной физике.

Цель работы

Целью работы является разработка методов калибровки, проведения абсолютных измерений и оценки чувствительности радаров, используемых для решения задач солнечно-земной физики, на основе данных Иркутского радара некогерентного рассеяния.

Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие задачи.

- Калибровка приемного тракта ИРНР, охватывающая измерения с 2011 г., с помощью разработанной модели шумовой температуры антенны. Калибровка передающего тракта по измерениям электронной концентрации.
- Проведение абсолютных измерений полного солнечного потока на частоте 161 МГц по данным радиоастрономических наблюдений ИРНР с учетом особенностей антенны. Проведение статистического анализа и анализа солнечного события по полученным измерениям потока.
- Разработка метода оценки чувствительности и диагностического потенциала радаров НР и МСТ. Сравнение потенциала действующего радара ИРНР и перспективного радара НР-МСТ в задачах исследования атмосферы.

Научная новизна

Впервые была разработана модель шумовой температуры антенны ИРНР и проведена абсолютная калибровка приемо-передающего тракта, охватывающая весь диапазон рабочих частот. Определены шумы приемной системы и чувствительность ИРНР.

Впервые получены абсолютные измерения солнечного потока на частоте 161 МГц за один солнечный цикл по данным радиоастрономических наблюдений ИРНР. При разработке метода оценки потока найдены поправки к модели диаграммы направленности ИРНР на частотах наблюдения Солнца.

Впервые разработан единый метод оценки диагностического потенциала радаров при исследовании атмосферы как методом НР, так и методами МСТ-радаров.

Научная и практическая значимость

Программный комплекс для получения шумовой температуры антенны ИРНР позволяет определять мощность шума неба на входе приемника для любой антенны с заданной диаграммой направленности и географическим положением. Модель шумовой температуры антенны ИРНР используется другими исследователями для определения источников и интенсивности шума. Абсолютная калибровка служит средством валидации других методов обра-

ботки экспериментальных данных ИРНР.

Методы калибровки и измерения солнечного потока разработаны с учетом разнообразия режимов проведения радиоастрономических наблюдений ИРНР. Это позволило обрабатывать архивные данные, усовершенствовать методы сбора данных и грамотно спроектировать новые режимы, используемые на радаре в настоящее время. Кроме того, калиброванные измерения фоновых шумов использованы при тестировании нового приемного тракта, который был введен в эксплуатацию в 2021 г.

Метод оценки диагностического потенциала использовался для определения требований к характеристикам перспективного НР-МСТ радара, проектируемого в рамках НГК.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработаны метод и программный комплекс для абсолютной калибровки приемопередающего тракта Иркутского радара некогерентного рассеяния, охватывающей весь частотный диапазон радара и применимой как к современным, так и архивным данным радиоастрономических и активных экспериментов. По результатам калибровки чувствительность радара по потоку составила 0.6 кЯн.

2. По абсолютным измерениям солнечного потока на ИРНР за период с 2011 по 2022 г. показано, что поток спокойного Солнца на частоте 161 МГц за один солнечный цикл составляет 5.5 с.е.п. Разработанный метод измерений позволяет исследовать как долгопериодные процессы, так и быстрые события в солнечной атмосфере.

3. Разработан метод оценки диагностического потенциала НР- и МСТ-радаров. Показано, что радар НР-МСТ позволит оценивать атмосферные параметры в ионосфере на высотах 100–1300 км, в стратосфере и тропосфере — на высотах до 25 км, и наблюдать мезосферные эха, что существенно превышает исследовательские возможности ИРНР.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, представленных в данной работе, обусловлена применением разных подходов к калибровке и современных методов цифровой обработки сигналов, а также соответствием полученных измерений общепринятым физическим моделям. Результаты калибровки согласуются с предыдущими научными и техническими работами, проводимыми по данным ИРНР, и были протестированы другими исследователями.

Личный вклад автора

Основные результаты работы получены лично автором диссертации либо при его непосредственном участии. Методы калибровки, определения шумовой температуры антенны, измерения солнечного потока и оценки диагностического потенциала были предложены, разработаны и реализованы автором данной работы. Автором разработан программный комплекс для обработки принятых сигналов ИРНР и реализации перечисленных методов.

Автор принимал активное участие в сборе данных, модернизации оборудования и проведении наблюдений на ИРНР. Оценка диагностического потенциала радара НР-МСТ и статистический анализ измерений солнечного потока проводились при определяющем участии автора.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на: 14-й, 15-й, 16-й конференциях молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике) (Иркутск, 2015, 2017, 2019), 14-й и 15-й Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2016, 2017), 2nd VarSITI General Symposium (Иркутск, 2017), 23-м Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Иркутск, 2017), 26-й и 28-й Всероссийских открытых научных конференциях «Распространение радиоволн» (Казань, 2019; Йошкар-Ола, 2023).

Соответствие паспорту специальности

Задача диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.3.4 «Радиофизика» в части пунктов 3–5.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, из которых 6 включены в список ВАК или входят в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, включая 2 таблицы и 55 рисунков. Список использованной литературы состоит из 180 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, отражена актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цели работы и решаемые задачи, приведено краткое содержание диссертации.

Глава 1 посвящена абсолютной калибровке приемо-передающего тракта ИРНР. В разделе 1.1 содержится описание распространенных методов калибровки приемо-передающих устройств.

В разделе 1.2 описываются радар ИРНР, режимы работы, модели принятого сигнала, используемые методы обработки данных и приводится обоснование выбора метода калибровки. Радар ИРНР работает в диапазоне 154–163 МГц (длина волны ~ 1.9 м) и представляет собой вытянутую рупорную антенну 246×12 м, разделенную на два полурупора, образующие два приемо-передающих канала [Лебедев, 2015]. Главный лепесток (луч) ДН каждого полурупора имеет ширину $0.5^\circ \times 20^\circ$ и электронным образом качается от вертикального направления до 30° на юг. Можно выделить три основных режима работы радара: ионосферный, спутниковый и радиоастрономический [Medvedev, Potekhin, 2019]. Радар использует частотный принцип сканирования: изменение рабочей частоты наклоняет луч ДН согласно уравнению сканирования и меняет ее форму [Лебедев, 2015], поэтому для разделения широкополосных сигналов по направлениям используется преобразование Фурье.

В разделе 1.3 рассматриваются методы обработки данных радиоастрономических наблюдений на ИРНР. Выходными данными первичной обработки является частотно-временная зависимость мощности принятого сигнала, полученная путем фурье-преобразования сигнала в каждом приемном канале. Любое изменение приемного тракта или ремонт ведут к изменениям характеристик, что требует повторной калибровки, поэтому калибровка проводится на ежедневной основе.

В разделе 1.4 рассматривается модель шумовой температуры антенны ИРНР, используемая при калибровке и основанная на модели распределения галактического радиоизлучения Global Sky Model (GSM) [Oliveira-Costa et al., 2008]. Модель GSM позволяет получить карту шума неба на произвольной частоте в диапазоне от 10 МГц до 100 ГГц. Для этого используется интерполяция существующих карт неба методом главных компонент.

Шумовая температура антенны T_A характеризует мощность шумов внешнего происхождения, воздействующих на приемную антенну. Так как ДН антенны ИРНР направлена преимущественно вертикально, доминирующим постоянным источником шума является шум неба, $T_A = T_n$. На некоторой фиксированной частоте f , шумовая температура связана с яркостной температурой T_y и ДН по мощности F^2 формулой:

$$T_n(f) = \frac{G(f)}{4\pi} \iint_{4\pi} T_{\text{я}}(\theta, \varphi, f) F^2(\theta, \varphi, f) \sin\theta d\theta d\varphi, \quad (1)$$

где G — коэффициент усиления антенны. Для получения модели шумовой температуры ИРНР, по модели GSM вычисляется T_n для суточной частотно-временной сетки с шагом 100 кГц по частоте и 5 мин по времени. Результат показан на рис. 1, а. Две яркие дуги, наблюдаемые с 5 до 15 ч — это следы (треки) прохождения радиоисточников Лебедь-А и Кассиопея-А через сектор обзора. Фоновое U-образное усиление шума с 5 до 20 ч — прохождение галактического диска. На рис. 1, б показан дневной ход шумовой температуры ИРНР на разных частотах. Программный комплекс для вычисления T_n можно использовать для построения модели шумовой температуры любой антенны в любой точке Земли.

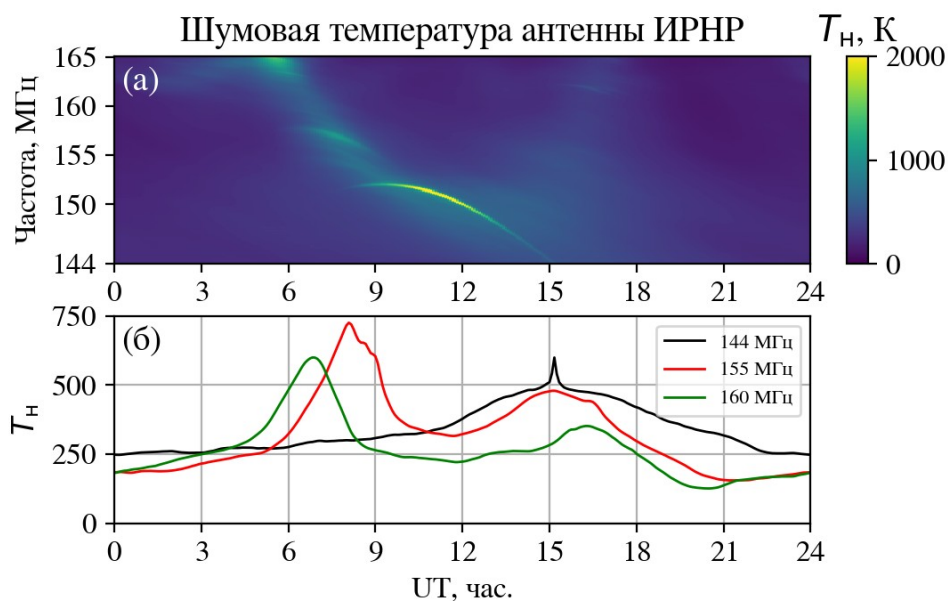


Рисунок 1. Частотно-временное распределение (а) шумовой температуры (ед. измерения — К) ИРНР в течение суток, 01.01.2015 (б) Дневной ход шумовой температуры на разных частотах

В разделе 1.5 описан метод калибровки приемного тракта ИРНР, применимый для архивных и современных данных радиоастрономических наблюдений и учитывающий частотную зависимость ДН и характеристик приемного тракта. Приводятся оценки ошибок определения калибровочных коэффициентов.

ИРНР — уникальная установка, многие элементы которой разрабатываются и постоянно модернизируются инженерами для улучшения качества наблюдений, в связи с чем характеристики приемника неоднократно менялись. Кроме того, параметры менялись с течением времени из-за влияния погодных условий и устаревания деталей. Для измерений принятой мощности наибольшее значение имеют вариации амплитудно-частотной характеристики приемника. Регулярность наблюдений шума неба и покрытие им всего частотного диапазона

делает метод калибровки, использующий в качестве эталонного сигнала карты шума неба, предпочтительнее по сравнению с калибровкой по радиоисточникам, затрагивающей только узкий частотный диапазон (рис. 1).

В методе калибровки мощности на входе приемника P_n используется простая линейная модель

$$P_{\text{АЦП}} = gP_n + P_{\text{шн}} = gk T_n B + P_{\text{шн}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{АЦП}}$ — мощность на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), записанная в выходных данных, g — усиление и потери сигнала в приемном канале, B — ширина полосы, $P_{\text{шн}}$ — собственные шумы приемника. Используя в качестве принятой мощности P_n модельную мощность космических шумов, рассчитывается линейная регрессия методом наименьших квадратов для определения калибровочных коэффициентов g , $P_{\text{шн}}$, которые впоследствии применяются к измерениям полезного сигнала. Коэффициенты вычисляются по данным одного дня наблюдений космического шума по отдельности для каждой частоты спектра. Пример работы метода показан на рис. 2 для частоты 155.5 МГц. Видно хорошее согласие между формами реально наблюдаемой мощности сигнала и модельной мощностью шума неба. Выброс вблизи 05 LT — это прохождение радиоисточника через диаграмму на частоте 155.5 МГц. Поскольку модель GSM учитывает распределенное радиоизлучение, радиоисточники на картах неба размыты и аппроксимируются неточно. В связи с этим сигналы от радиоисточников при расчете регрессии отфильтровываются.

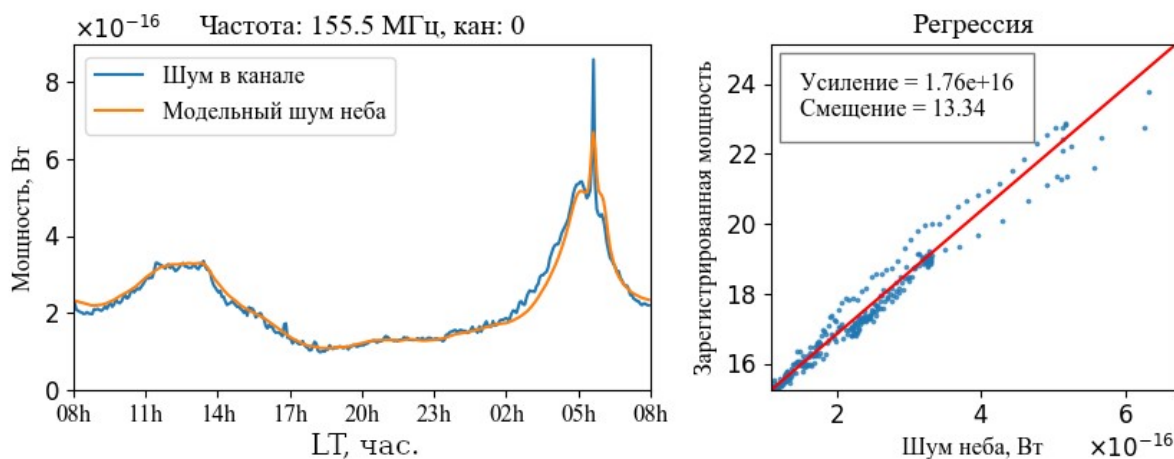


Рисунок 2. Результат подгонки модельного шума неба к реальным данным с помощью линейной регрессии. Справа в окне приведены полученные калибровочные коэффициенты g (усиление) и $P_{\text{шн}}$ (смещение)

В разделе 1.6 приводятся результаты почастотной калибровки приемного тракта. На рис. 3 показаны частотно-временные зависимости принятой мощности в радиоастрономическом режиме для одного дня наблюдения. На верхней панели показана мощность сигнала на выходе АЦП, на нижней — принятая мощность после калибровки в абсолютных единицах

(Вт). Благодаря калибровке радиоисточники стало легче различать. Трек радиоисточника с 00 до 09 UT принадлежит Солнцу, с 16 до 22 UT — Лебедю-А. На фоне треков виден галактический диск. В этот и следующий дни на Солнце наблюдалась мощная радиобуря, поэтому видно существенное утолщение трека, а также множество повторяющихся треков: это сигнал от Солнца попадает в боковые лепестки ДН.

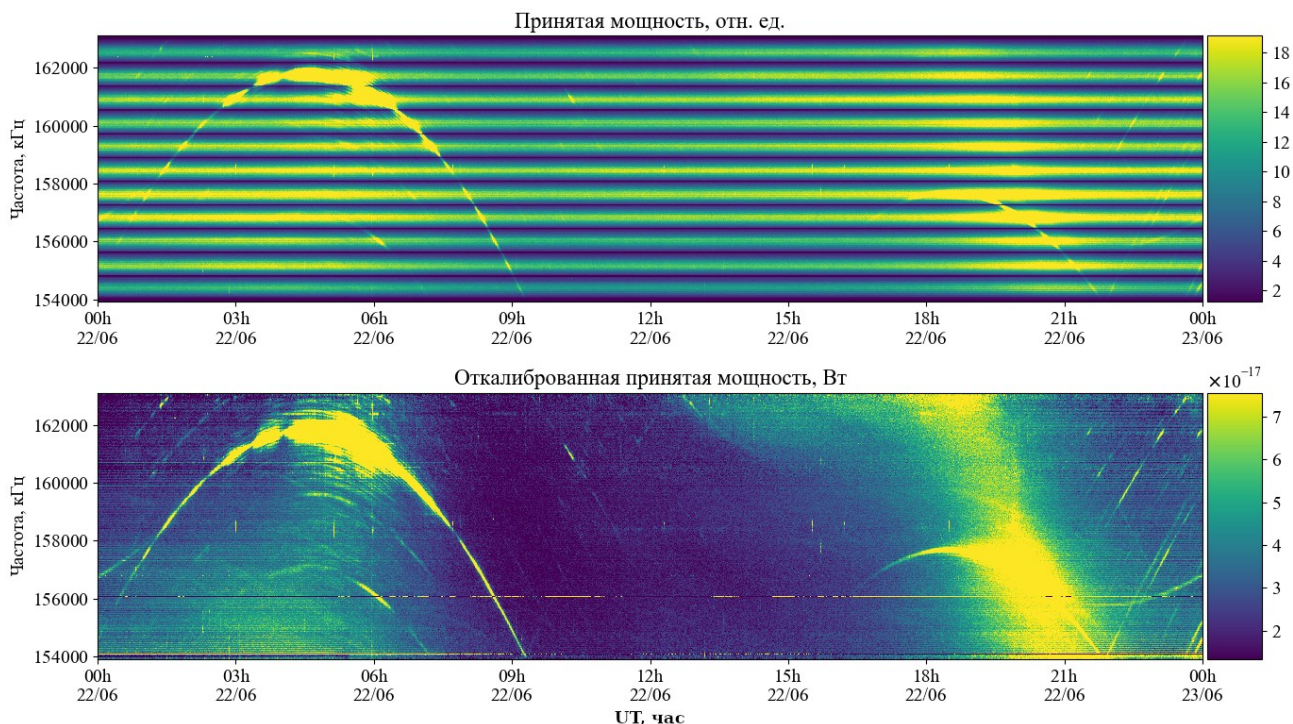


Рисунок 3. Результат калибровки 22.06.2015: исходная принятая мощность в относительных единицах (верхняя панель) и абсолютная принятая мощность (Вт) после калибровки (нижняя панель)

В разделе 1.7 описывается метод калибровки передающего тракта радара по измерениям электронной концентрации. Радиолокационные уравнения, применяемые для активных режимов работы, устанавливают связь между принятой мощностью, параметрами среды и характеристиками радара, включающими мощность излучения, коэффициенты усиления антенны и потери в приемном и передающем трактах. Излучаемая мощность на ИРНР может варьировать в пределах 2–3.2 МВт, и один из этапов калибровки в активном режиме включает в себя регулярный контроль значений передаваемой мощности. Мощность измеряется аналоговыми датчиками и отображается на аналоговых приборах; для цифровой регистрации мощности была разработана система удаленного контроля и телеметрии передатчиков.

Абсолютная калибровка по картам шума неба позволяет получить полное усиление в приемном тракте, а для передающего тракта необходима дополнительная калибровка. Так же как и ранее, для этого необходим сигнал с известной мощностью, которым в данном случае

выступает мощность некогерентного рассеяния. На ИРНР существует метод определения электронной концентрации по методу фарадеевских замираний [Shpynev, 2004], использующий относительные значения принятой мощности. Получив таким образом высотный профиль электронной концентрации, а также зная мощность излучения и характеристики приемного тракта, можно вычислить мощность сигнала некогерентного рассеяния $P_{\text{нр}}$ на входе приемника. Сравнением $P_{\text{нр}}$ с калиброванной принятой мощностью $P_{\text{п}}$ определяются потери, связанные с передающим трактом. На рис. 4 показаны пять дней ионосферных наблюдений, для которых был применен описанный метод калибровки передающего тракта. По результатам сравнения показано, что значение потерь в передающем тракте составляет ~ 0.4 .

Глава 2 посвящена абсолютным измерениям потока солнечного излучения в метровом диапазоне. Солнечное излучение в радиодиапазоне отражает структуру и динамику солнечной атмосферы [Shibasaki et al., 2011]. В частности, метровое излучение происходит из корональной плазмы. Для изучения этой части спектра солнечного излучения применяют как низкочувствительные спектрополяриметры [Benz et al., 2005], так и крупные радиотелескопы [Vocks et al., 2018]. ИРНР позволяет измерять солнечное излучение и обладает высокой чувствительностью, поэтому возможно измерение как интенсивных, так и слабых радиовсплесков с высоким временным разрешением, а также фоновой компоненты излучения.

В разделе 2.1 проводится сравнение ИРНР с другими научными инструментами для изучения Солнца и описываются эксперименты, проводимые на ИРНР. Измерения солнечного излучения в основном лепестке ДН ведутся с мая до середины августа в диапазоне частот 159–163 МГц (см. рис. 3), однако в боковые лепестки Солнце попадает также в апреле и сентябре. Начало измерений Солнца ведется со старта регулярных радиоастрономических наблюдений (2011 г.). В [Васильев и др., 2013] была показана схожесть формы сигналов от радиовсплесков, сопровождавших солнечную активность в 2011 г., по данным ИРНР и обсерваторий Кулгура, Лермонт и Нансэ. В [Васильев и др., 2013] исследовалась мощность принятого сигнала (в относительных единицах). Для более полного понимания физических процессов необходима возможность сравнения с измерениями на других инструментах и в других диапазонах частот, поэтому были разработаны методы определения потока солнечного излучения.

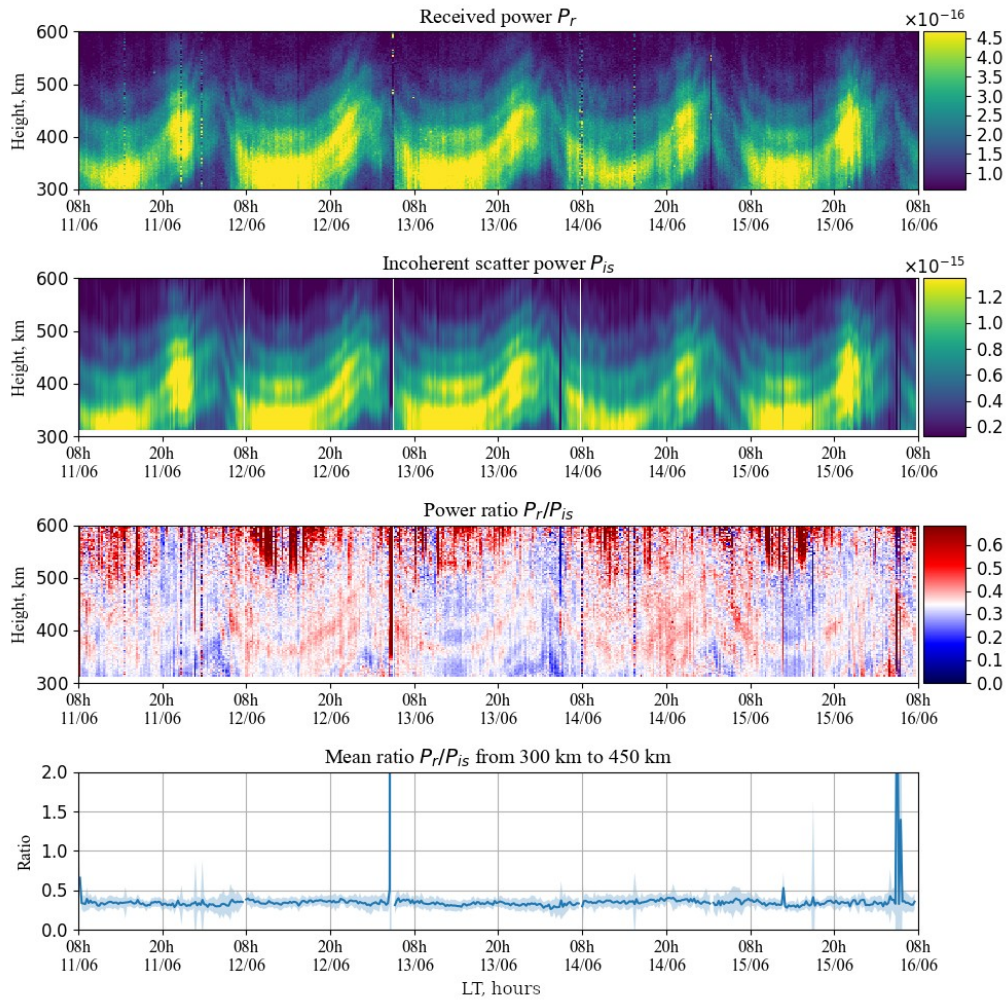


Рисунок 4. Сравнение значений абсолютной принятой мощности после калибровки и путем восстановления профиля мощности сигнала НР методом фарадеевских замираний. Сверху вниз — мощность принятого сигнала, мощность сигнала НР, отношение мощностей, среднее значение отношения в диапазоне высот 300–450 км

В разделе 2.2 рассматриваются методы оценки полного потока солнечного излучения по калиброванным измерениям принятой мощности. Характеристикой интегрального излучения радиоисточников служит спектральная плотность полного потока мощности излучения S , для краткости называемая полным потоком или просто потоком и определяемая как интеграл распределения интенсивности излучения I по радиоисточнику:

$$S = \iint_{\text{Исч}} I(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (3)$$

Особенности измерения потока связаны с размерами радиоисточника по отношению к угловому разрешению измеряющего инструмента. Мощность сигнала на входе приемника P_n связана с интенсивностью излучения I выражением

$$P_n = \frac{\lambda^2 GB}{8\pi} \iint_{4\pi} I(\theta, \varphi) F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (4)$$

где G — коэффициент усиления антенны, B — ширина полосы приемника. Радиотелескопы, у которых угловое разрешение намного меньше, чем размеры радиоисточника, позволяют получить двумерную картину распределения интенсивности излучения I и найти суммарный поток. С другой стороны, ширина ДН простых спектрополяриметров существенно превышает размеры большинства радиоисточников, поэтому значение $F^2(\theta, \varphi)$ практически постоянно в масштабах наблюдаемого радиоисточника. Для ИРНР оба этих способа определения потока солнечного излучения нельзя применить напрямую, поскольку ширина ДН составляет $0.5^\circ \times 20^\circ$, что сопоставимо с угловым размером Солнца $\sim 0.5^\circ$.

Для решения задачи определения солнечного потока на ИРНР используется принцип частотного сканирования. На фиксированной частоте ДН представляет собой луч — узкий в продольном направлении относительно длинной стороны антенны и широкий в поперечном направлении. Если проводится прием в некоторой полосе, то сигнал включает интегральное значение со всех направлений, соответствующих частотам полосы. Интегральная ДН $W(\theta, \varphi)$ будет шире, чем моночастотный луч. Например, на центральной частоте 161 МГц при полосе $B = 1000$ кГц ширина луча ДН становится равной $\sim 4^\circ$. В предположении, что интенсивность излучения Солнца слабо меняется в полосе B , а ДН достаточно широкая, чтобы считать ее значение постоянным в пределах солнечного диска, выражение (4) упрощается:

$$P_n = \frac{1}{2} \iint_{4\pi} I(\varepsilon, \gamma) W(\varepsilon, \gamma) \cos \varepsilon d\varepsilon d\gamma = \frac{1}{2} W_0 \iint_{4\pi} I(\varepsilon, \gamma) \cos \varepsilon d\varepsilon d\gamma = \frac{1}{2} W_0 S_{\text{сол}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{сол}}$ — искомый поток солнечного излучения, (ε, γ) — антенный азимут и угол места ИРНР, значение $W(\varepsilon, \gamma)$ вычисляется по модели ДН, $1/2$ предполагает прием в одной поляризации.

В разделе 2.3 описана модель солнечного трека ИРНР, разработанная для коррекции ДН в диапазоне частот, охватывающих наблюдения Солнца. При анализе дневных изменений мощности сигнала солнечного излучения было обнаружено, что модель ДН некорректно описывает их форму. Так, модель предполагает гауссообразную форму с одним максимумом, в то время как в реальном сигнале могут наблюдаться два или три пика. Возможная причина расхождения с моделью ДН: частоты, на которых наблюдается Солнце, находятся в верхней части рабочего диапазона, в то время как основная проверка модели проводилась для нижней части диапазона, где луч направлен ближе к вертикали.

Для коррекции ДН на частотах наблюдения Солнца была разработана модель солнечного трека, основанная на нормированных треках спокойного Солнца. На верхней панели рис. 5 показано ожидаемое значение трека согласно модели ДН, на нижней — изменение нормированной на единицу формы дневного трека спокойного Солнца от дня ко дню в течение периода солнечных наблюдений (конец апреля – середина августа). Временной диапазон

04:00–07:00UT соответствует наблюдениям в основном луче ДН, в остальное время Солнце попадает в боковые лепестки. В середине июня в треках наблюдается один выраженный пик, в остальное время пиков может быть несколько.

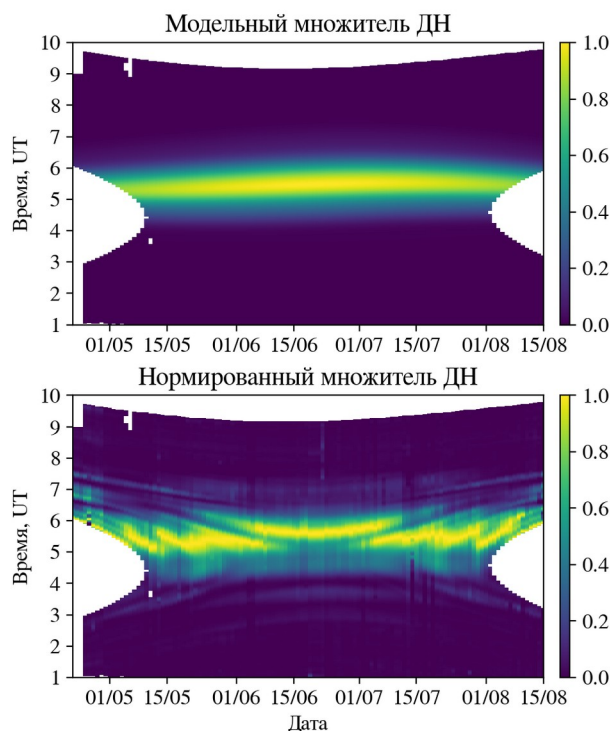


Рисунок 5. Модельные (вверху) и калибровочные (внизу) треки спокойного Солнца для периода солнечных наблюдений

В разделе 2.4 показаны результаты измерений солнечного потока на ИРНР и проводится их первичный анализ. После калибровки принятой мощности и учета корректировок ДН для каждого доступного дня наблюдений был получен солнечный поток — всего 634 дня измерений с 2011 по 2022 г. Стандартной единицей измерений солнечного потока является с.е.п. — солнечные единицы потока, $1 \text{ с.е.п.} = 10^5 \text{ Ян} = 10^{-21} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$. Поскольку на ИРНР проводится независимый прием сигналов двух полурупоров, представляющих два канала, поток определяется в каждом из них отдельно. На рис. 6 показано сравнение потоков, полученных в двух каналах во время шумовой бури, — радиовсплеска I типа [Железняков, 1964], во время которого наблюдалось длительное многократное повышение фонового излучения со множеством кратковременных всплесков интенсивности. Измеренный поток хорошо согласуется между каналами, повторяя форму и значения. Поскольку ДН полурупоров немного отличаются друг от друга и направлены слегка в разные стороны, время наблюдения Солнца в максимуме ДН в каналах отличается, поэтому измерения охватывают разный временной диапазон.

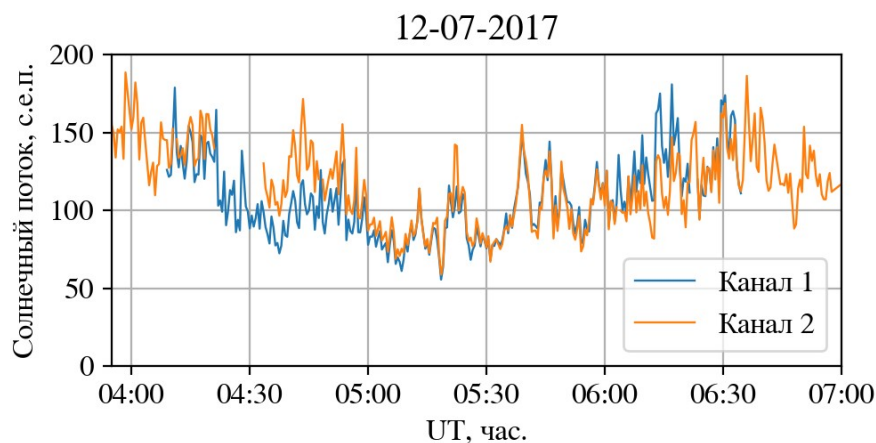


Рисунок 6. Измерения солнечного потока в двух каналах (канал 1 — верхний полурупор, канал 2 — нижний полурупор) во время шумовой бури

В разделе 2.5 описан метод оценки ошибок измерений потока. Измерения включают несколько этапов: калибровку приемного тракта, корректировку ДН и вычисление солнечного потока. Каждый этап добавляет собственную ошибку измерения. Для измерений потока было найдено среднеквадратичное отклонение (СКО) и показано, что для 92 % измерений относительное СКО менее 10 %, для 98 % измерений — менее 20 %. В эти ошибки, однако, не включена систематическая погрешность, обусловленная ошибками при калибровке, неточностью корректировки ДН, отклонением модельных карт шума неба от реальных, и допущениями, принятыми при вычислении солнечного потока. Точно определить эту погрешность сложно, но на основе анализа полученных измерений предполагаемый диапазон систематической ошибки составляет 5–25 %.

Раздел 2.6 содержит сравнительный корреляционный анализ измерений солнечного потока на частоте 161 МГц с 2011 по 2022 г. по данным ИРНР и на частоте 245 МГц по данным станций Лермонт. Станция Лермонт принадлежит сети RSTN [Giersch et al., 2017] и является одной из ближайших к ИРНР по меридиональному расположению обсерваторий, где регулярно измеряют калиброванный поток солнечного излучения в метровом диапазоне. Прием ведется на восьми дискретных частотах, из которых ближайшая к частотам ИРНР составляет 245 МГц. Сравнительный анализ проводился для всех измерений ИРНР (с 2011 г.) и всех измерений обсерватории Лермонт (с 2006 г.) до 2022 г.

Распределение измерений среднесуточного солнечного потока за все время наблюдения (рис. 7, левая панель) показывает, что поток меняется в широких пределах от единиц до сотен с.е.п. и в среднем выше для 245 МГц, но в потоке на 161 МГц, измеренном на ИРНР, больше значений выше 100 с.е.п. Для того чтобы отделить поток спокойного Солнца от потока медленно меняющейся компоненты излучения и радиовсплесков, были отобраны дни, когда число солнечных пятен равно нулю в день наблюдения, а также в предыдущий и последующий

ющий дни. Для минимума солнечной активности в [Benz, 2009] приводятся формулы, аппроксимирующие поток спокойного Солнца, согласно которым поток на частоте 161 МГц составляет 4.8 с.е.п., на 245 МГц — 11.1 с.е.п. (черные линии на правых панелях рис. 7). Реально наблюдаемые средние значения распределений близки к модельным, но немного превышают их.

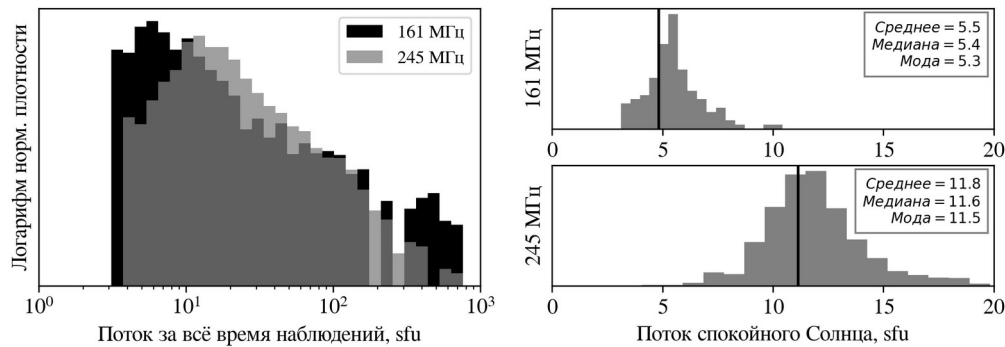


Рисунок 7. Гистограммы распределения среднесуточного потока солнечного излучения на 161 и 245 МГц за все время наблюдения (слева) и для спокойного Солнца (справа). Черной линией на графиках справа отмечено модельное значение потока спокойного Солнца

Корреляционный анализ среднесуточных потоков на 161 и 245 МГц показал, что они обладают высокой корреляцией Пирсона $r = 0.71$ и меньшей корреляцией Спирмана $s = 0.67$, если используются все доступные данные. Корреляция Пирсона существенно снижается (до 0.54), если предварительно отфильтровать наиболее интенсивные значения потока, которые возникают, например, во время шумовых бурь. В то же время корреляция Спирмана снижается незначительно. Это говорит о том, что, во-первых, события с экстремальными значениями потока часто наблюдаются одновременно на 161 и 245 МГц и, во-вторых, что в спокойных условиях потоки связаны нелинейной зависимостью. Была также проанализирована связь с индексом солнечной активности $F10.7$ [Tapping, 2013] — потоком солнечного излучения на частоте 2800 МГц, часто используемым при моделировании ионосферы. С $F10.7$ ситуация противоположная — низкая корреляция Пирсона $r = 0.26$ для обоих исследуемых потоков при использовании всех данных и высокая $r = 0.68$ при фильтрации дней с наиболее интенсивными значениями потока. В то же время корреляция Спирмана высока как в отсутствие фильтрации, так и при ее использовании. Из этого следует, что экстремальные значения потока метрового диапазона редко сопровождаются соответствующими по амплитуде усилениями потока $F10.7$ и связь между $F10.7$ и потоками 161/245 МГц нелинейна. Было также показано, что в среднем корреляция $F10.7$ с данными ИРНР выше, чем с данными обсерватории Лермонт.

По автокорреляции внутрисуточных вариаций потока для соседних дней наблюдений

было показано, что в данных как ИРНР, так и Лермонт присутствуют дни с суточным ходом, не связанным с изменениями солнечного потока, а обусловленным погрешностью при определении потока. При этом число таких дней не зависит от месяца наблюдения, но меняется от года к году.

Раздел 2.7 посвящен наблюдениям солнечных радиовсплесков на ИРНР, по результатам которых был проведен анализ радиовсплеска 22 мая 2021 г., появившегося на фазе спада круговой вспышки.

Обработка первичных данных в радиоастрономическом режиме включает усреднение, снижающее дисперсию мощности принятого сигнала, и автоматическую фильтрацию выбросов. Для изучения радиовсплесков был разработан дополнительный программный комплекс, позволяющий напрямую работать с квадратурами принятого сигнала для наиболее точной фильтрации и получения максимального временного разрешения. Таким образом, было обработано большинство всплесков, которые наблюдались на ИРНР с 2017 г. после введения режима слежения за радиоисточниками.

Одно из событий было исследовано детально — вспышка на Солнце 22 мая 2021 г., которая сопровождалась радиовсплеском, наблюдаемым в разных диапазонах: на частоте 161 МГц по данным ИРНР, на частоте 5.6 ГГц на Сибирском радиогелиографе и по данным спектрополяриметров. Вспышка являлась круговой, т. е. имеющей особую круговую форму с купольной структурой магнитных линий. Центральная отрицательная часть области вспышки окружена положительным кольцом, на котором замыкаются магнитные линии из центра. Из области над куполом магнитные силовые линии идут у удаленному источнику, а также присутствуют открытые силовые линии, уходящие в корону.

Было показано, что всплеск, наблюдаемый на ИРНР, имеет солнечную природу и связан с исследуемым событием, а также виден на спектрах e-Callisto. Радиовсплеск на частоте 161 МГц предшествовал всплескам на частотах 5.6 ГГц и 72 МГц, поэтому возмущение изначально возникло в короне на высоте, соответствующей 161 МГц, и ускорило электроны в разные стороны вдоль силовых линий вниз, возбуждая излучение на 5.6 ГГц, и вверх, возбуждая излучение в верхней короне. Связь между всплесками на 161 МГц и 5.6 ГГц подтверждается с помощью вейвлет-анализа (периоды вариаций в обоих радиовсплесках совпадают), а картина силовых линий была подтверждена путем экстраполяции магнитограмм в область короны.

В главе 3 представлен метод оценки диагностического потенциала радаров некогерентного рассеяния (НР) и мезосферно-стратосферно-тропосферных (МСТ) радаров. В ходе калибровки приемного тракта радара определяются собственные шумы, которые ограничивают минимальный уровень детектируемых радаром сигналов. Для описания минималь-

ного уровня сигналов часто используется понятие чувствительности системы. Поскольку радары для исследования атмосферы Земли используются для оценки физических параметров, их чувствительность должна учитывать достигаемую статистическую точность измеряемых параметров. Вместе с характеристиками антенны и передатчиков чувствительность описывает диагностический потенциал радара в задачах исследования атмосферы, который может использоваться для сравнения радаров между собой и при проектировании новых инструментов.

В разделе 3.1 приводится обзор физических принципов работы НР- и МСТ-радаров и видов проводимых ими измерений, в частности, абсолютных измерений. В основе метода НР лежит томпсоновское рассеяние на электронах [Evans, 1969]. Из-за взаимного влияния электронов и ионов в плазме спектр сигнала обратного рассеяния имеет сложную форму из двух основных компонент: плазменной и ионно-звуковой линий. Форма ионно-звуковой линии зависит от электронной концентрации, температуры электронов и ионов, скорости дрейфа плазмы, массы разных сортов ионов. Путем решения обратной задачи определяются высотные профили этих ионосферных параметров. Важное значение в методе НР имеет выбор частоты, а точнее, соотношение между длиной волны и радиусом Дебая D плазмы. Если $\lambda \ll D$, в спектре рассеяния будет только тепловое движение электронов без колебаний плазмы, а если $\lambda \gg D$, рассеяние происходит на флуктуациях электронной концентрации, а не на индивидуальных электронах. Частотный диапазон всех радаров НР попадает в интервал 46–1330 МГц.

Принцип работы радаров МСТ основан на рассеянии на турбулентных флуктуациях в нейтральной атмосфере [Hocking, 2011]. Большая часть МСТ-радаров работает на частоте 50 МГц. Интенсивность рассеяния зависит от энергетического спектра турбулентных флуктуаций. Наблюдения в тропосфере — стратосфере возможны на высотах до 30 км, так как выше сигнал значительно ослабевает. Усиление рассеяния в мезосфере происходит из-за повышения электронной концентрации, благодаря чему растет градиент показателя преломления. Наблюдаются также интенсивные мезосферные эхо-сигналы в летний период из-за образования ледяных частиц и в зимний период из-за повышения электронной концентрации и усиления турбулентностей. Анализ интенсивности, доплеровского сдвига и ширины спектра сигнала позволяет определять высотные профили скорости диссипации турбулентной энергии, полного вектора скорости нейтрального ветра и характеристик волновых процессов [Hocking, 1985].

В разделе 3.2 описывается разработанный метод оценки диагностического потенциала радара при измерении параметров атмосферы. Для того чтобы определить возможность измерения некоторого параметра атмосферы, проводится сравнение удельной эффективной

площади рассеяния (УЭПР) единичного объема среды $\sigma_{\text{ср}}$ [1/м] с чувствительностью радара. Чувствительность можно определить как минимальную УЭПР $\sigma_{\text{мин}}$, которой должна обладать среда для достижения необходимой статистической точности, и она зависит исключительно от характеристик радара и метода обработки сигнала. Если $\sigma_{\text{ср}}$ превышает $\sigma_{\text{мин}}$, проведение измерений возможно. Поскольку радары измеряют высотные профили параметров, метод позволяет получить диапазон высот, где возможно проведение измерений, при заданной модели среды. Минимальная УЭПР $\sigma_{\text{мин}}$ определяется из основного радиолокационного уравнения и для случая объемного рассеяния имеет вид

$$\sigma_{\text{мин}} = \frac{128\pi^3 R^2 k T_c B}{P_u L \tau c \lambda^2 \int_{4\pi} G_u G_n d\Omega} \text{ОСШ}, \quad (6)$$

где T_c — шумовая температура системы, B — полоса приема, ОСШ — отношение сигнал/шум, P_u — мощность излучения, L — потери, τ — длина импульса, G_u , G_n — коэффициенты усиления антенны на излучение и прием. ОСШ определяется требованиями к статистической точности в зависимости от выбранного метода обработки. Для режима МСТ использовались аналитические оценки, а для НР — эмпирические по опыту радаров EISCAT.

Выражения для УЭПР среды $\sigma_{\text{ср}}$ находятся из теории рассеяния. Для НР $\sigma_{\text{ср}}$ приведено, например, в [Evans, 1969], для турбулентного рассеяния в тропосфере и стратосфере — в [Hocking, 1985], для мезосферы и мезосферных эх — в [Lubken, 2014].

В разделе 3.3 оцениваются потенциалы радара ИРНР и перспективного радара НР-МСТ, строящегося в рамках НГК, и проводится их сравнительный анализ. Оба радара обладают одним и тем же рабочим диапазоном 154–163 МГц и по энергетическим характеристикам и собственным шумам эти радары близки, однако радар НР-МСТ имеет ряд существенных преимуществ. Цифровая система диаграммообразования фазированной решетки радара НР-МСТ позволит гибко управлять формой и направлением ДН в секторе обзора $\pm 45^\circ$, кроме того, радар состоит из двух независимых антенных полостей и позволит вести прием в двух ортогональных поляризациях одновременно. Ввиду особенностей синхронизации частота повторения импульсов ИРНР не превышает 24.4 Гц, а в настоящее время равна ~ 10 Гц, в то время как радар НР-МСТ обладает частотой повторения до 5 кГц. Оценка диагностического потенциала показала, что это преимущество определяет превосходство радара НР-МСТ.

На рис. 8 показаны высотные зависимости отношения $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$, определяющие диагностический потенциал радара НР-МСТ при измерении высотных профилей электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e и скорости дрейфа плазмы V . В качестве модели ионосферы использовалась IRI. Левая панель показывает измерения на высотах 100–600 км в режиме НР-1, правая — измерения выше 600 км в наиболее энергетически затратном режиме НР-2. Проведение измерений возможно на высотах, где отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}} > 1$, а там, где пре-

вышение значительное, возможно увеличение временного разрешения или снижение погрешности измерения. Из рисунка следует, что радар НР-МСТ позволит измерять N_e на высотах до 1300 км.

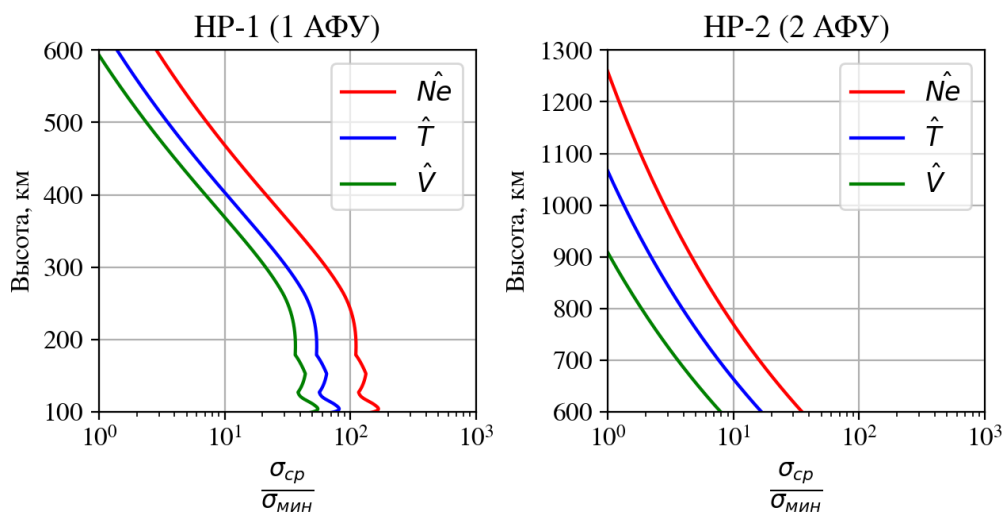


Рисунок 8. Диагностический потенциал НР-МСТ при измерении параметров ионосферы. Слева — режим НР-1 (100–600 км), справа — режим НР-2 (600–1300 км)

На рис. 9 показано сравнение потенциала ИРНР с реально наблюдаемой относительной ошибкой измерения N_e , оцененной по одному дню наблюдений ионосферы. Высотные профили ИРНР начинаются от ~160 км из-за интенсивных помех от рельефа местности на низких высотах. На 530 км имеется пик в ошибке оценки N_e — следствие отраженных от спутников Starlink помеховых сигналов, которые регулярно присутствуют на этих высотах. Промоделированный потенциал спадает на высотах 500–600 км, что подтверждается ростом ошибки в реальных данных. Начиная с этих высот измерения на ИРНР редки, ведутся при низком ОСШ и обладают высокой погрешностью.

В отличие от ИРНР радар НР-МСТ способен исследовать область МСТ. Он работает в диапазоне ~158 МГц, однако, так как в области МСТ частота носит определяющее значение, важно сравнить диагностический потенциал по отношению к стандартной для МСТ-радаров частоте 50 МГц и популярной среди радаров НР частоте 233 МГц. Моделирование рассеяния на турбулентных флуктуациях показало, что в стратосфере — тропосфере наблюдения на радаре НР-МСТ возможны до высоты ~25 км, а увеличение частоты приводит к повышению диагностического потенциала. В мезосфере показана возможность наблюдения летних и зимних мезосферных эх на радаре НР-МСТ на высотах от 65 до 90 км. В этом случае показано, что меньшая частота имеет преимущество, но наблюдения возможны даже на 233 МГц, хотя и в существенно меньшем диапазоне высот.

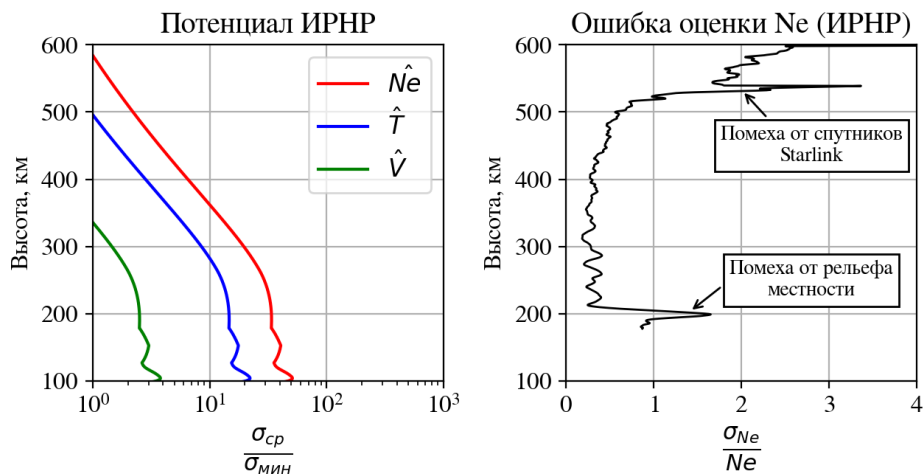


Рисунок 9. Сравнение диагностического потенциала ИРНР (слева) и относительной ошибки определения N_e , усредненной за день наблюдений (справа)

В разделе 3.4 на основе проведенного анализа приводятся рекомендации по выбору характеристик и конфигураций современных радиолокационных систем, совмещающих в себе функции НР- и МСТ-радаров.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Разработан метод и программный комплекс для абсолютной калибровки приемного тракта ИРНР по картам шума неба, применимый для большинства режимов работы и позволяющий измерять принятую мощность сигнала в ваттах. Разработана модель шумовой температуры антенны ИРНР. Проведена абсолютная калибровка всех радиоастрономических данных с 2011 по 2022 г., а именно, получены частотные зависимости усиления и собственных шумов приемного тракта. По результатам калибровки средняя шумовая температура приемной системы ИРНР составила 420 К (шум неба и собственные шумы). Проведена калибровка передающего тракта путем сравнения измеренных абсолютных значений мощности и мощности некогерентного рассеяния, полученной по фарадеевским вариациям. Для этого было разработано телеметрическое оборудование, позволяющее регистрировать мощность излучения. Показано, что потери в передающем тракте составляют ~ 0.4 .

2. Разработан метод и программный комплекс для определения солнечного потока на частоте 161 МГц по данным радиоастрономических наблюдений ИРНР. Разработана модель солнечного трека ИРНР, необходимая для оценки потока. Проведены калиброванные измерения потока для 634 дней наблюдений с 2011 по 2022 г. и оценена погрешность измерений. Разработано программное обеспечение для оценки солнечного потока во время радиовсплесков, позволяющее достичь максимального временного разрешения.

3. По полученным измерениям солнечного потока на 161 МГц был проведен статистический и корреляционный анализ в сравнении с измерениями потока на 245 МГц станции

Лермонт и индексом $F10.7$. Определено, что среднее значение потока спокойного Солнца, измеряемого на ИРНР, составляет 5.5 с.е.п., что согласуется с теоретическими значениями. Показано, что интенсивные вариации среднедневного потока часто происходят одновременно на 161 и 245 МГц, но не сопровождаются соответствующими по амплитуде усилениями потока $F10.7$. Связь между потоками 161 МГц, 245 МГц и $F10.7$ носит нелинейный характер. Автокорреляция внутрисуточных вариаций потока на 161 и 245 МГц показала, что в данных ИРНР и Лермонт присутствуют дни с суточным ходом, обусловленным погрешностью измерений.

4. Проведен анализ радиовсплеска 22 мая 2021 г., появившегося на фазе спада круговой вспышки и проявившегося в измерениях солнечного потока ИРНР. Показано, что радиовсплеск на частоте 161 МГц предшествовал всплескам на частотах 5.6 ГГц и 72 МГц, поэтому возмущение изначально возникло в короне на высоте, соответствующей 161 МГц, и ускорило электроны в разные стороны вдоль силовых линий.

5. Разработан метод оценки диагностического потенциала радаров НР и МСТ в задачах исследования атмосферы Земли. С помощью этого метода было проведено сравнение радаров НР-МСТ и ИРНР и показано, что перспективный радар НР-МСТ, строящийся в рамках Национального гелиогеофизического комплекса, обладает более высоким исследовательским потенциалом. Благодаря уникальной рабочей частоте, высокому энергетическому потенциалу, гибкости системы формирования импульсов и частоте повторения импульсов до 5 кГц возможны не только изучение ионосферы методом НР на высотах до 1300 км, но и исследования тропосферы, стратосферы и мезосферы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Potekhin A.P, **Setov A.G.**, Lebedev V.P., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Prospective IS-MST radar. Potential and diagnostic capabilities // Solar-Terrestrial Physics. 2016. V.2, N.3. P. 3–16. DOI: 10.12737/22281.
2. **Setov A.G.**, Medvedev A.V., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S., Tashlykov V.P. Calibration methods for absolute measurements at the Irkutsk incoherent scatter radar // Proceedings of 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics, N. 10466, Irkutsk. 2017. DOI: 10.1117/12.2287328.
3. **Setov A.G.**, Globa M.V., Medvedev A.V., Vasilyev R.V., Kushnarev D.S. First results of absolute measurements of solar flux at the Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) // Solar-Terrestrial Physics. 2018. V.4 N.3. P. 24–27. DOI: 10.12737/stp-43201804.
4. Medvedev A.V., Potekhin A.P., **Setov A.G.**, Kushnarev D.S., Lebedev V.P. All-atmosphere IS-MST radar // Solar-Terrestrial Physics. 2020. V.6, N.2. P. 41–48. DOI: 10.12737/stp-62202004.
5. **Setov A.G.**, Kushnarev D.S., Vasilyev R.V., Medvedev A.V. Long-term solar flux observations with Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) in 2011–2019 // Solar-Terrestrial Physics. 2020. V.6, N.3. P. 29–33. DOI: 10.12737/stp-63202004.
6. Лебедев В.П., **Сетов А.Г.**, Ермаков В.Ю. Антенна Иркутского радара некогерентного рассеяния: математическая модель, методы калибровки // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». 2022, Муром, с. 527–537. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-527-537.
7. **Setov A.G.**, Kushnarev D.S. Correlation analysis of solar flux absolute measurements at 161 and 245 MHz // Solar-Terrestrial Physics. 2023. V.9, N.4. P. 46-54. DOI: 10.12737/stp-94202306.
8. Motyk I.D., Kashapova L.K., **Setov A.G.**, Shamsutdinova Yu. N., Kupriyanova E.G. Quick event during the decay phase of the microwave emission of a flare on May 22, 2021 // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. V.63, N.7. P. 1062-1071. DOI: 10.1134/S0016793223070174.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Р.В., Кушнарев Д.С., Кашапова Л.К., и др. Первые результаты радионаблюдений Солнца и мощных дискретных источников на Иркутском радаре // *Астрономический журнал*. 2013. Т. 90. № 11. С. 948-958.
2. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. «Наука», 1964. 560 с.
3. Лебедев В.П. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов // Канд. диссерт. Иркутск, 2015. 118 с.
4. Baars J.W.M. History of Flux-Density Calibration in Radio Astronomy // *URSI Radio Science Bulletin*. 2014. Vol. 2014. № 348. P. 47-66. DOI: 10.23919/URSIRSB.2014.7909943.
5. Benz A.O., Monstein C., Meyer H. CALLISTO - A New Concept for Solar Radio Spectrometers // *Solar Physics*. 2005. Vol. 226. P. 143-151. DOI: 10.1007/s11207-005-5688-9.
6. Benz A.O. Radio emission of the quiet Sun // *Landolt-Börnstein*. 2009. Vol. VI/4B. P. 1-13. DOI: 10.1007/978-3-540-88055-4_5.
7. Evans J.V. Theory and Practice of Ionosphere Study by Thomson Scatter Radar // *Proceedings of the IEEE*. 1969. Vol. 57. № 4. P. 496-530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005.
8. Giersch O., Kennewell J., Lynch M. Solar Radio Burst Statistics and Implications for Space Weather Effects // *Space Weather*. 2017. Vol. 15. № 11. P. 1511-1522. DOI: 10.1002/2017SW001658.
9. Hocking W.K. A review of Mesosphere-Stratosphere-Troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997-2008 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. Vol. 73. P. 848-882. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.12.009.
10. Hocking W.K. Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: A review // *Radio Science*. 1985. Vol. 20. № 6. P. 1403-1422. DOI: 10.1029/RS020i006p01403.
11. Lehtinen M.S. Statistical theory of incoherent scatter radar measurements // Ph.D. Thesis. Kiruna, Sweden, 1986. 98 p.
12. Lubken F.-J. Turbulent scattering for radars: A summary // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. Vol. 107. P. 1-7. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.015.
13. McCrea I., Aikio A., Alfonsi L., et al. The science case for the EISCAT_3D radar // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2015. Vol. 2. № 21. P. 1-63. DOI: 10.1186/s40645-015-0051-8.
14. Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future // *Hist. Geo Space Sci*. 2019. Vol. 10. P. 215-224. DOI: 10.5194/hgss-10-215-2019.
15. Oliveira-Costa A., Tegmark M., Gaensler B.M., et al. A model of diffuse Galactic radio

emission from 10 MHz to 100 GHz // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2008. Vol. 388. P. 247-260. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13376.x.

16. Renkwitz T., Singer W., Latteck R., Rapp M. Validation of the radiation pattern of the Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY) // *Adv. Radio Sci.* 2012. Vol. 10. P. 245-253. DOI: 10.5194/ars-10-245-2012.

17. Shibasaki K., Alissandrakis C.E., Pohjolainen S. Radio Emission of the Quiet Sun and Active Regions (Invited Review) // *Solar Physics.* 2011. Vol. 273. P. 309-337. DOI: 10.1007/s11207-011-9788-4.

18. Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // *Radio Science.* 2004. Vol. 39. № RS3001. P. 1-8. DOI: 10.1029/2001RS002523.

19. Swarnalingam N., Hocking W.K., Argall P.S. Radar efficiency and the calibration of decade-long PMSE backscatter cross-section for the Resolute Bay VHF radar // *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 1643-1656. DOI: 10.5194/angeo-27-1643-2009.

20. Tanaka H., Castelli J.P., Covington A.E., et al. Absolute calibration of solar radio flux density in the microwave region // *Solar Physics.* 1973. Vol. 29. P. 243-262. DOI: 10.1007/BF00153452.

21. Tapping K.F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7) // *Space Weather.* 2013. Vol. 11. P. 394-406. DOI: 10.1002/swe.20064.

22. Van Trees H.L. Detection, estimation, and modulation theory. Part I: Detection, Estimation, and Filtering Theory. Second edition. «John Wiley & Sons, Inc.», 2013. 1151 p.

23. Vocks C., Mann G., Breitling F., et al. LOFAR observations of the quiet solar corona // *Astronomy & Astrophysics.* 2018. Vol. 614. DOI: 10.1051/0004-6361/201630067.

24. Wang J., Yue X., Ding F., et al. Simulation and Observation Evaluation of Space Debris Detection by Sanya Incoherent Scatter Radar // *Radio Science.* 2022. Vol. 57. DOI: 10.1029/2022RS007472.