
ВСЕАТМОСФЕРНЫЙ РАДАР НР-МСТ ALL-ATMOSPHERE IS-MST RADAR

А.В. Медведев*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, medvedev@iszf.irk.ru***А.П. Потехин[†]***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия***А.Г. Сетов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, setov@iszf.irk.ru***Д.С. Кушнарев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ds_k@iszf.irk.ru***В.П. Лебедев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lebedev@iszf.irk.ru***A.V. Medvedev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, medvedev@iszf.irk.ru***A.P. Potekhin[†]***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia***A.G. Setov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, setov@iszf.irk.ru***D.S. Kushnarev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ds_k@iszf.irk.ru***V.P. Lebedev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, lebedev@iszf.irk.ru*

Аннотация. Радар НР-МСТ, как следует из названия, сочетает в себе два разных метода исследования атмосферы по сигналу обратного рассеяния. В мезосфере—стратосфере—тропосфере (МСТ) рассеяние происходит на турбулентных флуктуациях среды. В верхней атмосфере появляется некогерентное рассеяние (НР) в ионосферной плазме. Раньше создавались специализированные инструменты, спроектированные таким образом, чтобы эффективность измерений в одном из этих режимов была наибольшей. МСТ-радары использовались для исследования волновой активности в нижней и средней атмосфере, НР-радары — для исследования ионосферы. Однако в настоящее время для всестороннего изучения атмосферных явлений необходимо иметь представление о процессах во всех атмосферных слоях и околоземном космическом пространстве. Радар, комбинирующий возможности проведения НР- и МСТ-измерений, позволит охватить слои от тропосферы до плазмосферы и изучать как процессы переноса энергии из нижней и средней атмосферы в ионосферу, так и взаимодействие магнитосферы с верхней атмосферой. Помимо атмосферных исследований, радар позволит отслеживать космические аппараты и космический мусор, определяя точные координатные характеристики. Кроме того, антенная система подходит для проведения радиоастрономических наблюдений. В работе сделано обоснование выбора рабочего диапазона 154–162 МГц и рассмотрены технические решения, используемые в проекте радара НР-МСТ, а также приведены основные режимы работы. Дополнительно дается оценка диагностического потенциала радара для разных типов проводимых измерений.

Ключевые слова: радар НР-МСТ, Национальный гелиогеофизический комплекс, некогерентное рассеяние, мезосферно-стратосферно-тропосферный радар, ионосфера, атмосфера.

Abstract. The IS-MST radar, as the name implies, combines two different methods for studying the atmosphere using a backscatter signal. Turbulent fluctuations of the medium cause scattering in the mesosphere—stratosphere—troposphere (MST). In the upper atmosphere, incoherent scatter (IS) appears in ionospheric plasma. Special-purpose instruments have been built before such that measurements in one of these modes were the most effective. MST radars were utilized for studying wave activity in the lower and middle atmosphere; the IS radar, for ionospheric research. Nowadays, however, for a comprehensive investigation of atmospheric phenomena, it is necessary to have an idea of processes in all atmospheric layers and near-Earth space. The radar, which combines capabilities of IS and MST measurements, will be able to cover layers from the troposphere to the plasmosphere and to study processes of energy transfer from the lower and middle atmosphere to the ionosphere as well as the interaction of the magnetosphere with the upper atmosphere. Apart from atmospheric research, the radar will allow us to track spacecraft and space debris, determining precise coordinate characteristics. The antenna system is also suitable for radio astronomical observations. In the paper, we provide justification for the 154–162 MHz frequency range and discuss technical solutions of the IS-MST radar project and basic operating modes. In addition, we estimate radar diagnostic capabilities for different types of measurements.

Keywords: IS-MST radar, National Heliogeophysical Complex, incoherent scatter, mesosphere-stratosphere-troposphere radar, ionosphere, atmosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера и околоземное космическое пространство — сложные взаимосвязанные системы, для исследования которых требуются научные инструменты широкого диапазона. Необходимо не только изучать отдельные слои систем — нижнюю и среднюю нейтральную атмосферу, ионосферу, плазмосферу и магнитосферу, — но и взаимодействие между ними.

Состояние ионосферы в значительной мере влияет на человеческую деятельность. Повышенная солнечная активность приводит к геомагнитным бурям, во время которых происходит возмущение ионосферы и появляются неоднородности. Возмущения и неоднородности изменяют характеристики распространения радиоволн, из-за чего пропадают сигналы между наземными станциями и спутниками и изменяется направление распространения на КВ-радиотрассах. Кроме того, электрические поля, возникающие в ионосфере, наводят токи в протяженных проводящих конструкциях — проводах электропередач и трубопроводах, что приводит к преждевременному износу оборудования. Во время мощных бурь возможно нарушение работы или разрушение проводящих систем. Динамика верхней атмосферы (ВА) в значительной степени определяется процессами в магнитосфере. Во время бурь происходит высыпание энергичных частиц из радиационного пояса, а в магнитосфере возникают мощные электрические поля и токи. Это, в свою очередь, приводит к изменению ионизации и возникновению токов в ионосфере. Для мониторинга космической погоды необходимо детально и на регулярной основе следить за состоянием ионосферы и изучать процессы взаимодействия магнитосферы с ВА.

Если магнитосфера влияет на ВА сверху, то динамика и химические процессы в тропосфере, стратосфере и мезосфере (МСТ-регион) воздействуют снизу. МСТ-область определяет структуру и ионный состав ионосферной плазмы и влияет на перераспределение энергии между разными областями верхней и средней атмосферы. Планетарные волны (ПВ) и мезомасштабные, среди которых главную роль играют внутренние гравитационные волны (ВГВ), образуются в тропосфере и распространяются в стратосферу, мезосферу и термосферу, приводя к процессам интенсивного вертикального взаимодействия. Причинами возникновения волн всех масштабов являются метеорологические процессы, землетрясения, взрывы и т. д. Волны влияют на общую динамику атмосферы и переносят энергию и импульс в верхние слои атмосферы.

Фундаментальной проблемой современной физики солнечно-земных связей является количественное описание этих процессов, определение границ возможного для детерминированного предсказания результатов взаимодействий в физической системе Солнце—Земля, разработка современных эффективных моделей прогноза состояния атмосферы и околоземного космического пространства, учитывающих весь комплекс горизонтальных и вертикальных связей в этой системе.

Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук (НГК РАН) включает целый кластер радиофизических инструментов для изучения космической погоды, процессов в ионосфере и атмосфере. Самым информативным инструментом кластера является радар НР-МСТ, позволяющий получать высотные профили разных физических параметров в огромном высотном диапазоне 10–1500 км. Он охватывает как область мезосферы—стратосферы—тропосферы (МСТ), где данные будут получены методом рассеяния радиоволн на турбулентностях и неоднородностях показателя преломления нейтральной атмосферы, так и ионосферу и плазмосферу, где измерения проводятся с помощью метода некогерентного рассеяния (НР). Радар НР-МСТ разрабатывается ОАО «РТИ» (Москва) на базе современного цифрового оборудования с антенной системой в виде фазированной решетки (ФАР).

Метод НР позволяет получить подробную информацию об ионосфере на отдельных высотах в локализованной области пространства и при этом не ограничен высотами ниже максимума ионизации. Современные радары НР измеряют параметры плазмы сразу в нескольких независимых вертикальных срезах ионосферы, благодаря чему можно определить трехмерную структуру неоднородностей, характеристики возмущений и направление их перемещения. Метод НР основан на рассеянии волн на тепловых флуктуациях электронов. Поскольку электроны и ионы в ионосферной плазме влияют друг на друга, сигнал обратного рассеяния обладает сложным спектром, компоненты которого соответствуют разным колебаниям в плазме. Форма спектра зависит от физических параметров ионосферы, которые можно определить, решая обратную задачу для НР-рассеяния. По ионно-звуковой компоненте спектра можно восстановить электронную концентрацию, температуры электронов и ионов, скорость дрейфа плазмы в радиальном направлении, массу ионов и интенсивность электрического поля [Evans, 1969]. Электронная линия НР-спектра имеет смещение по частоте, равное собственной частоте плазмы, а амплитуда линии зависит от электронной концентрации. Поскольку ионосферная плазма находится в магнитном поле, возникает эффект Фарадея — вращение плоскости поляризации распространяющейся волны, причем скорость вращения также зависит от электронной концентрации. Радар НР-МСТ будет обладать всеми необходимыми характеристиками для измерения параметров ионосферы от D- и E-слоев до плазмосферы благодаря малому радиогоризонту и гибкости в выборе режимов работы.

Помимо волновой активности, в нижней и средней атмосфере появляются интенсивные турбулентности и вытянутые горизонтальные слои, которые приводят к частичному отражению падающей волны. В мезосфере возникают летние и зимние мезосферные эха [Cho, Kelley, 1993; Kirkwood, 2007] и регулярно сгорают метеоры, оставляя за собой плазменные следы, существующие несколько секунд. Ос-

новой принцип действия МСТ-радаров основан на рассеянии на турбулентных флуктуациях с характерными масштабами, равными половине длины волны. По гауссовой форме сигнала рассеяния определяется интенсивность, доплеровский сдвиг и ширина спектра, что позволяет измерять скорость диссипации турбулентной энергии, полный вектор скорости нейтрального ветра и характеристики ВГВ отражающих атмосферных слоев и мезосферного эха [Hocking, 2011]. Как правило, НР-радары обладают достаточным энергетическим потенциалом для МСТ-исследований, однако существует ряд других требований. Так, МСТ-радар должен иметь как можно меньший радиогоризонт, т. е. максимальное расстояние, на котором ожидается отражение излученных электромагнитных волн от объектов рельефа местности. Кроме того, при исследовании тропосферы и стратосферы необходим высокий интервал повторения импульсов. Чтобы эффективно изучать мезосферу и нижнюю термосферу, нужно формировать чередующиеся последовательности, чтобы с ростом высоты не возникало неопределенности по дальности и при этом сохранялось необходимое разрешение по времени (см., например, [Farley, 1972]).

В последнее время в околоземном космическом пространстве стало появляться все больше искусственных спутников и, следовательно, космического мусора разных размеров. Помимо исследований атмосферы, на радаре НР-МСТ будет проводиться систематический мониторинг космических объектов (КО). ФАР радара позволяет электронным образом управлять лучом, мгновенно перестраиваясь на другое направление излучения и приема. Благодаря этому можно отслеживать КО непосредственно во время атмосферных и ионосферных наблюдений. Предполагается слежение за каталогизированными объектами и поиск неизвестных объектов.

Антенная система радара позволяет в пассивном режиме проводить радиоастрономические наблюдения. Появление неоднородностей в ионосфере сказывается на сигнале, который приходит от мощных космических радиоисточников, что проявляется в виде ионосферных мерцаний [Yeh, Liu, 1982]. В сектор обзора радара НР-МСТ попадают такие источники, как Лебедь-А, Кассиопея-А и Крабовидная туманность, на которых эффект мерцаний будет выраженным. Гибкость режимов работы НР-МСТ позволяет вести одновременно активные и пассивные эксперименты, чередуя периоды излучения и пассивного приема. Интерес представляют также наблюдения Солнца. Активность на Солнце может приводить к возникновению радиовсплесков — интенсивных скачков потока солнечного излучения. Всплески сопровождаются разными физическими процессами на Солнце: корональные выбросы массы, вспышки и появление активных областей. Интенсивность всплесков может на несколько порядков превосходить поток излучения спокойного Солнца. Регистрация таких событий на радаре НР-МСТ особенно интересна, так как в метровом диапазоне длин волн мало солнечных радиометров с большой площадью антенны.

Радар НР-МСТ уникален также с точки зрения месторасположения, так как в России нет инструмента, позволяющего проводить измерения во всей атмосферной толще. В мире насчитывается около десяти НР-радаров, причем большинство сконцентрировано в полярных областях. Появляются новые установки — например, недавно был построен НР-радар в Китае [Ding et al., 2018]. Ведется строительство радарного комплекса EISCAT-3D, который позволит получать трехмерное изображение состояния ионосферной плазмы [McCrea et al., 2015]. Существует множество тропосферно-стратосферных радаров, однако полноценных МСТ-радаров мало, так как для измерений в мезосфере существенно возрастают требования к мощности излучения и эффективной площади антенны. Еще меньше инструментов, проводящих НР- и МСТ-измерения одновременно. Подобные измерения проводились на MU-радаре в Японии. Новый МСТ-радар MAARSY, расположенный в Норвегии, обладает достаточным потенциалом для проведения измерений обоих типов [Latteck et al., 2012]. Радар PANSY изначально проектировался как НР/МСТ-радар для исследования атмосферы над Антарктикой [Sato et al., 2014].

Отдельно стоит упомянуть взаимодействие НР-МСТ-радара и других инструментов НГК. В рамках проекта планируется строительство нагревного стенда. Подобный инструмент позволяет расширить исследовательский потенциал радиофизических обсерваторий, исследующих верхнюю атмосферу. Мощная волна накачки стенда приводит к возникновению разнообразных явлений, возмущений и неоднородностей в ионосфере [Streltsov et al., 2018]. НР-радар является главным диагностическим инструментом исследования искусственного влияния на ионосферу. В рамках НГК на площадке радара планируется также разместить лидар, охватывающий высоты стратосферы и мезосферы. Он позволит получать информацию о нейтральной составляющей атмосферы: химическом составе, скорости нейтрального ветра, температуре и т. д. Данные лидара дополнят измерения НР-МСТ-радара, что позволит составить более полную картину процессов в атмосфере.

Далее мы опишем проект радара НР-МСТ, рассмотрим принятые технические решения и режимы работы, а также оценим диагностический потенциал для разных выполняемых задач.

ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН РАДАРА

Современные МСТ- и НР-радаров покрывают частотный диапазон 45–1300 МГц. Невозможно охватить столь широкий диапазон частот, при этом обеспечив необходимые технические характеристики радара, такие как мощность излучения, согласование элементов антенного поля и требования к сектору обзора. Для решения поставленных задач требуется внимательно подойти к выбору оптимальной рабочей частоты.

Большинство МСТ-радаров работают на частотах вблизи 50 МГц [Hocking, 1997]. Это связано с мощностью обратного рассеяния на турбулентных флук-

туациях в нейтральных тропосфере и стратосфере и в ионизированной мезосфере. Из-за турбулентного перемешивания в тропосфере, стратосфере и мезосфере возникает градиент показателя преломления. При прохождении электромагнитной волны с длиной, равной двукратному характерному масштабу флуктуации показателя преломления, происходит брэгговское рассеяние. Интенсивность рассеяния зависит от распределения энергии турбулентных флуктуаций по частотам. Спектр флуктуаций изменяется с высотой и делится на три интервала. В первом длинноволновом интервале происходит преобразование энергии движения воздуха в турбулентные флуктуации. В интервале инерции энергия медленно убывает с уменьшением масштабов вихрей по закону $k^{-5/3}$. Последняя часть спектра — интервал вязкости, где происходит резкое затухание (k^{-7}) турбулентностей и энергии переходит в тепло. Максимальное значение энергии спектра также зависит от высоты и после 25–30 км убывает, что делает наблюдения выше этой границы нецелесообразными. В результате основной областью, где возможно проведение измерений, является высотный диапазон 5–25 км, причем максимум рассеяния наблюдается на частотах ~50 МГц (флуктуации с характерными масштабами ~3 м). В мезосфере рассеяние на турбулентностях вновь усиливается из-за повышения электронной концентрации, однако максимум энергии флуктуаций смещается в сторону больших характерных размеров (10–1000 м) [Hocking, 1985] и выбор рабочей частоты становится определяющим. Кроме того, в летнее и зимнее время в мезосфере периодически возникают явления, называемые полярными мезосферными эхами, видимые даже на радарх дециметрового диапазона [Rapp et al., 2008]. Иногда эхо сопровождается появлением серебристых облаков, которые бывают видны невооруженным взглядом. Как правило, облака образуются на 3–4 км ниже высоты появления мезосферного эха. Изначально эхо наблюдалось только в полярных регионах, однако впоследствии появились наблюдения и на среднеширотных радарх. Например, в измерениях, проводимых [Zeller et al., 2006], эхо появлялось в 7 % общего времени наблюдения. Явление мезосферного эха до сих пор является малоизученным, и для его исследования требуется комплекс оптических и радиофизических инструментов [Lübken et al., 2016].

Современные НР-радары работают в диапазоне метровых и дециметровых длин волн [Robinson, 2004]. В нижней части диапазона рабочая частота ограничена собственной частотой ионосферы, при которой происходит полное отражение излученной волны (20–30 МГц), а также уровнем шумов неба. Если на 300 МГц шумовая температура космического радиоизлучения составляет 100 К, на 150 МГц — 300 К, то на 50 МГц — уже 10 000 К и отношение сигнал/шум значительно снижается. С учетом слабого сигнала НР и необходимости проведения измерений на высотах от 1000 км, шум неба становится серьезным ограничивающим фактором. Верхняя граница рабочего диапазона определяется условием применимости метода НР: длина волны должна

быть намного больше радиуса Дебая. В ионосферной плазме значения радиуса Дебая растут с высотой и к 1000 км может достигать 10 см. Поэтому для исследований методом НР оптимальные рабочие частоты лежат в диапазоне 200–500 МГц.

Таким образом, невозможно выделить рабочую частоту, оптимальную как для МСТ-измерений, так и для метода НР. Компромиссным решением является диапазон ~150 МГц. В ведомстве ИСЗФ СО РАН находится Иркутский радар НР (ИРНР), который расположен в 240 км от НР-МСТ и работает в частотном диапазоне 152–164 МГц [Medvedev, Potekhin, 2019]. Благодаря тому, что в Иркутской области практически нет источников радиоизлучения, которые работают в диапазоне 150–170 МГц, нет необходимости в дополнительных работах по расчистке радиодиапазона для новой частоты. Кроме того, в распоряжении Института имеется множество приборов, радиоэлектронных компонентов и методик обработки сигналов, применимых именно для диапазона ~150 МГц, например, уникальный метод определения электронной концентрации по скорости вращения плоскости поляризации электромагнитной волны (эффект Фарадея) [Shrynev, 2004]. Он позволяет определять концентрацию без проведения калибровки и эффективен в полосе частот от 120 до 170 МГц, так как именно в этом диапазоне эффект Фарадея хорошо выражен в принятом сигнале, что необходимо для решения обратной задачи.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАДАРА

В настоящее время составлен аванпроект радара и идет подготовка к строительству. Радар будет расположен вблизи оз. Байкал в Тажеранских степях (местность Харикта). Во-первых, с целью уменьшения радиогоризонта радара было выбрано место с естественной впадиной. По расстоянию до ближайших холмов и гор на топографической карте было вычислено, что радиогоризонт НР-МСТ составит не более 10 км. Во-вторых, по результатам измерений электромагнитной совместимости в интересующем диапазоне частот было показано, что в этой местности уровень помех минимален. Кроме того, возможно наблюдение состояния тропосферы и стратосферы непосредственно над озером, что поможет составлению климатических моделей.

На рис. 1 показано, как будет выглядеть радар НР-МСТ. Две ФАР расположены на расстоянии 100 м друг от друга и имеют наклон 20° в противоположные стороны таким образом, чтобы охватывать как можно большую область пространства. При этом эффективность излучения каждой решетки в вертикальном направлении меняется незначительно. Между антенными решетками располагаются контейнеры с приемо-передающим оборудованием, элементами контроля, синхронизации и регистрации принятых сигналов. Посередине расположен центр контроля и сбора данных, куда будет поступать телеметрия со всей радарной системы и где будет задаваться форма излучаемых сигналов для текущего

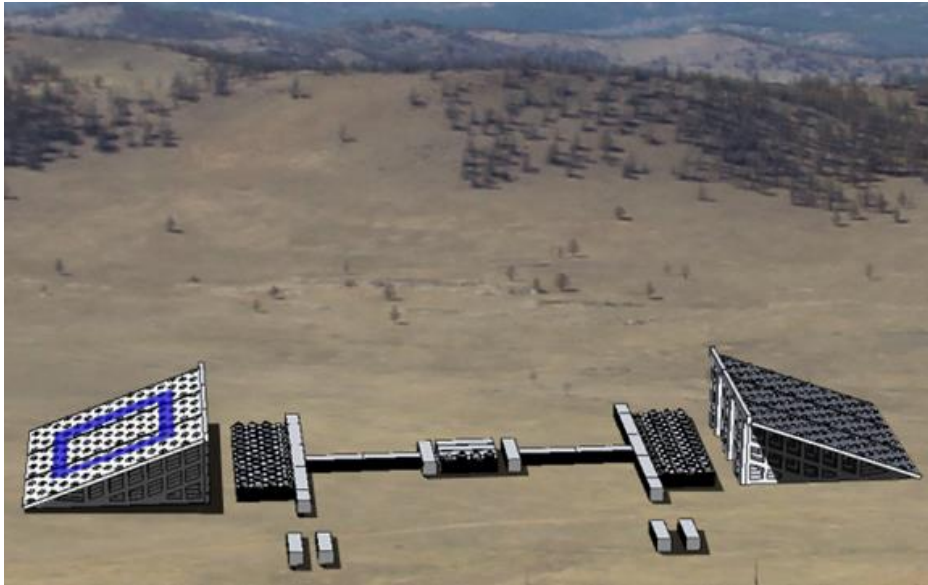


Рис. 1. Общий вид радара НР-МСТ

Таблица 1

Основные технические характеристики радара НР-МСТ

Диапазон рабочих частот	154–162 МГц
Размер антенного поля	40×40 м
Число излучателей антенного поля	1536
Тип элемента антенны	Крест-вибратор
Пиковая мощность излучения одной решетки	1 МВт
Количество антенных решеток	2 (разнесение 100 м)
Эффективная площадь антенного поля	1250 м ²
Шумовая температура системы	~500 К
Ширина луча одной решетки	2.5°×2.5°
Ширина полосы приемника	625 кГц
Минимальное разрешение по высоте	480 м
Сектор обзора антенного поля	±45°

режима работы и происходит первичная обработка принятых квадратур.

В табл. 1 представлены основные характеристики радара НР-МСТ. Каждое антенное полотно радара состоит из 1536 крест-вибраторов, расположенных в узлах треугольной сетки. При работе сразу двумя решетками в одном направлении, можно добиться пиковой мощности излучения 2 МВт в узком луче размером 2.5°×2.5°. ФАР позволяют управлять лучом электронным образом, благодаря чему можно получать параметры атмосферы на нескольких вертикальных срезах, попеременно излучая и принимая сигналы в нескольких направлениях. Крест-вибраторы позволят отдельно принимать две ортогональных поляризации. Возбуждающий сигнал будет подаваться только на один из диполей антенн для формирования волны с линейной поляризацией. Это необходимо для применения метода определения абсолютной электронной концентрации [Shpynev, 2004].

Два антенных поля, расположенных на расстоянии 100 м, образуют интерферометрическую базу, необходимую для изучения тонкой структуры процессов в нейтральной атмосфере и ионосфере, получения точных орбитальных характеристик КО, а также для повышения углового разрешения при радиоастрономических наблюдениях. База радара протянута вдоль магнитных силовых линий, одно из антенных полей направлено на север, другое — на юг. Сектор обзора каждого антенного поля составляет ±45° от основного направления. Из-за наклона решеток область наблюдения в направлении север—юг расширяется до ±65°. Все это позволит более детально исследовать процессы, происходящие вдоль магнитных силовых линий.

Форма излучаемого сигнала определяется режимом работы и формируется в цифровом синтезаторе, после чего сигнал переводится в аналоговую форму и разветвляется на передатчики. Там производится

Таблица 2

Режимы работы НР-МСТ при исследовании атмосферы

	Режим МСТ	Режим НР-1	Режим НР-2
Частота повторения импульсов, Гц	1333.3	250	75
Длительность импульса, мкс	51.2	700	6500
Скважность, %	6.8	17.5	37.5
Произведение средней мощности и эффективной площади, Вт·м ²	$3.4 \cdot 10^8$	$8.75 \cdot 10^8$	$18.75 \cdot 10^8$

аналоговое фазирование в соответствии с требуемым направлением и после излучения формируется луч $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Радар обладает общей системой синхронизации, в которой разные сигналы тактирования разветвляются и приходят на отдельные приемопередающие блоки.

Цифровая приемная система устроена сложнее — каждая ФАР разбита на 12 подрешеток по 128 антенн. Подрешетки подключены к отдельным независимым приемопередающим модулям, где происходит частичное диаграммообразование, что позволяет сформировать один приемный канал. Таким образом, на выходе одной антенной решетки доступно 12 приемных каналов. Подрешетка включает только 128 соседних антенн, поэтому лепесток для такого канала в 12 раз шире, чем основной. Позже на этапе первичной обработки приемные каналы можно суммировать с разными фазами, получая узкие приемные лучи $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ в разных направлениях. Эту возможность можно использовать для повышения углового разрешения на приеме, одновременной работы в активном и пассивном режимах, а также исследования широкой области, облучаемой нагревным стендом, который имеет более широкий основной лепесток. Кроме того, приемная система ФАР полностью цифровая. Сигналы с отдельных антенн усиливаются в малошумящем усилителе, фильтруются и оцифровываются. Уменьшив число аналоговых компонентов, можно избежать искажений принятого сигнала. В свою очередь, благодаря применению современной элементной базы обеспечивается большой динамический диапазон, который требуется для измерений как мощных отраженных сигналов на малых высотах, так и слабых НР-сигналов с высот плазмосферы.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ РАДАРА

Радар с большой площадью антенны и высокой излучаемой мощностью — редкий инструмент, с помощью которого, как показано выше, можно решать множество научных и практических задач. Чтобы извлечь максимум пользы из работы радара, необходимо грамотно подойти к выбору режимов работы. На рис. 2 схематично показаны основные режимы работы: исследование атмосферы, мониторинг КО, совместные наблюдения и пассивные радиоастрономические наблюдения. В табл. 2 даны настройки режимов работы для регулярных иссле-

дований нижней и средней атмосферы (МСТ) и ионосферы (НР-1, НР-2). В табл. 2 приведена также такая характеристика, как произведение средней излучаемой мощности на эффективную площадь PA , которая часто используется для оценки диагностического потенциала радаров.

При работе радара в МСТ-режиме (рис. 2, а) основным наблюдаемым параметром атмосферы является скорость нейтрального ветра. Для получения полного вектора скорости требуется работать в трех направлениях одновременно. Поскольку тропосфера/стратосфера находятся на малом расстоянии от радара, частота повторения импульсов может быть высокой. Сигнал рассеяния на турбулентностях обладает узким спектром порядка нескольких герц, поэтому статистические характеристики сигнала меняются слабо. Обычно для оценки параметров атмосферного рассеяния вычисляют автокорреляционную функцию (АКФ) принятого сигнала и по ее фазе определяют радиальную скорость. Однако дисперсия определения скорости высока, поэтому требуется накопление сигнала [Zrnic, 1979]. Сигналы от отдельных импульсов когерентно суммируются в течение некоторого промежутка времени, затем оцениваются АКФ и параметры атмосферы. В тропосфере и стратосфере не требуется высокое PA и для проведения измерений можно использовать одно антенное поле или даже его часть. В мезосфере требуется режим с большим PA .

Для исследования ионосферы будут использоваться два режима работы: НР-1 (рис. 2, б) и НР-2 (рис. 2, в), соответствующие двум высотным диапазонам: до 500 км и выше 500 км. Это разделение следует из опыта проведения НР-измерений на ИРНР. Интенсивность рассеяния на высотах до 500 км достаточно велика для стабильной оценки параметров ионосферной плазмы, поэтому можно повысить временное разрешение, меньше усредняя принятый сигнал. В режиме НР время когерентности сигнала становится меньше, чем время распространения импульса, поэтому когерентное накопление применить нельзя. АКФ рассеяния оценивается по одному импульсу, и далее АКФ с разных импульсов усредняются. Поэтому требуется, чтобы длина импульса была большой. Чтобы сохранить при этом высокое разрешение по высоте, применяют сложные сигналы. Для оценки скорости дрейфа плазмы в режиме НР-1 используются три луча, как и в МСТ-режиме. На высотах от 500 км НР-сигнал значительно ослаб-

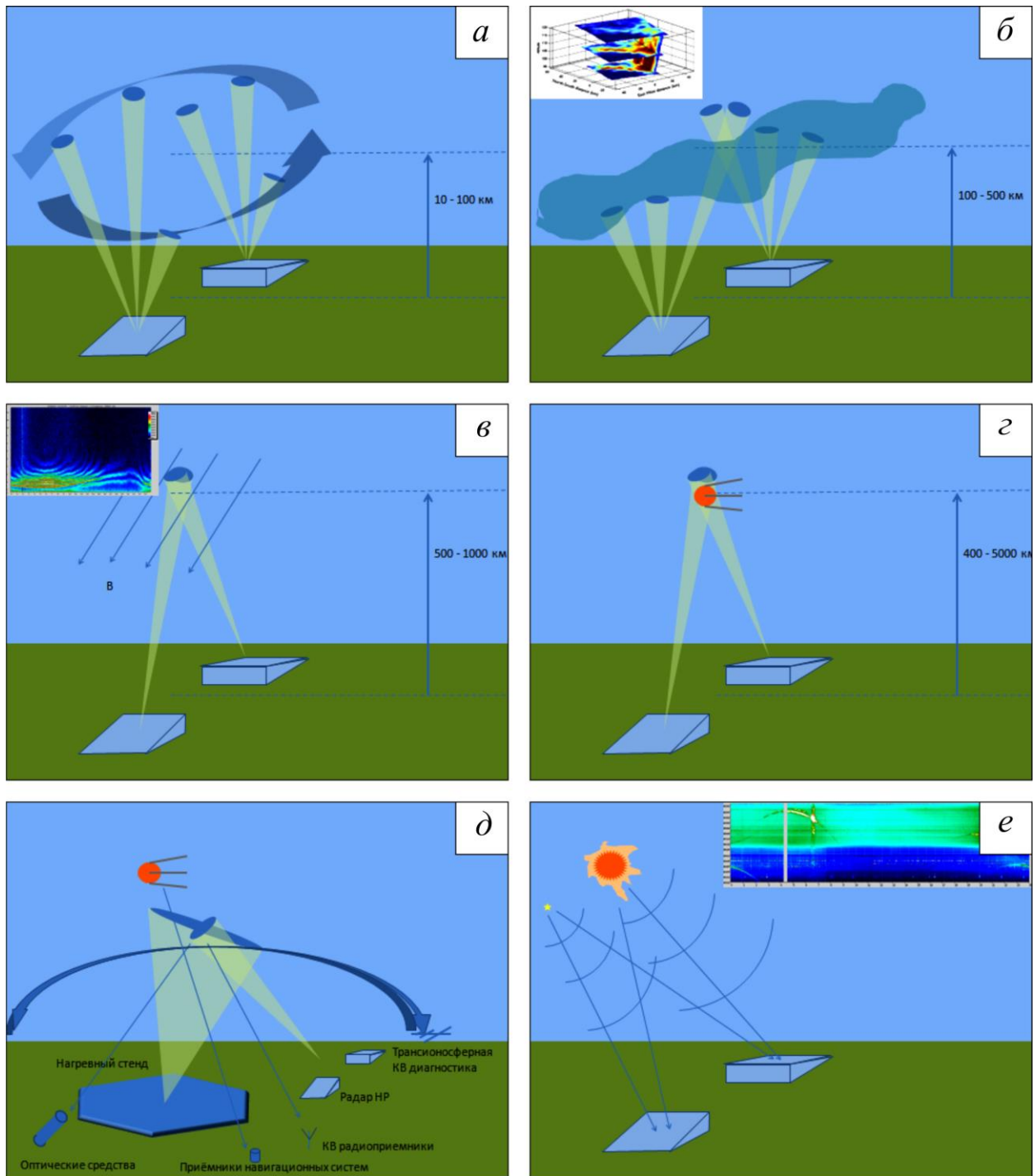


Рис. 2. Режимы работы НР-МСТ: МСТ-режим (а); режим НР-1 (б); режим НР-2 (в), режим наблюдения за КО (г); режим совместных наблюдений (д), радиоастрономический режим (е)

ляется, и для получения максимального энергетического потенциала от радара используются большая длительность импульса и высокая скважность, а работа ведется двумя ФАР в одном направлении.

В режиме отслеживания КО (рис. 2, г) один или оба луча радара наблюдают заранее заданные объекты с известными орбитальными характеристиками либо работают в поисковом режиме для обнаружения неизвестных КО. Во время регулярных НР-измерений будет также постоянно отслеживаться появление КО в секторе обзора радара НР-МСТ. На рис. 2, д показан режим совместных

наблюдений, когда область ионосферы, облучаемая нагревным стендом, сканируется радаром НР-МСТ, оптическими средствами, КВ-приемопередатчиками и системой ГНСС-приемников. Положение инструментов НГК выбиралось таким образом, чтобы можно было проводить подобные эксперименты по наблюдению за состоянием атмосферы. Последний из режимов, показанный на рис. 2, е — радиоастрономические наблюдения, когда радар не излучает, а регистрирует космические сигналы с разных направлений. В этом режиме можно полноценно использовать способность радара по диаграммо-

образованию, создавая несколько узких приемных лучей одновременно, а также использовать интерферометрические возможности. Помимо представленных режимов, будут проводиться специальные эксперименты, например, по наблюдению когерентного эха.

За два десятилетия работы с данными радара ИРНР появилось множество методик обработки сигналов ИР-измерений, мониторинга КО и пассивных наблюдений. В работе [Shrynev, 2004] описан метод определения электронной концентрации по углу поворота плоскости поляризации. В работе [Berngardt, Kushnarev, 2013] авторы предлагают метод повышения высотного разрешения при оценке параметров ионосферной плазмы, в котором используется разница между импульсами разной длительности. В [Shcherbakov et al., 2009] показан метод определения скорости дрейфа плазмы, применяемый на ИРНР. Авторы работы [Medvedev et al., 2013] комбинируют данные радара ИРНР и дигизонда для определения характеристик и направления распространения перемещающихся ионосферных возмущений. Возможности ИРНР и используемые методики при наблюдении космического мусора изложены в [Khakhinov et al., 2009]. Для фильтрации помех при отражении радиоволн от объектов рельефа местности был разработан метод, основанный на когерентном накоплении принятого сигнала [Tashlykov et al., 2019]. Метод определения солнечного потока, основанный на калибровке по мощным радиоисточникам и картам шума неба представлен в работе [Сетов и др., 2018]. Авторы работы [Vasilyev et al., 2017] по мерцаниям радиоисточника Лебедь-А определяют значение индекса сцинтилляций S4 и оценивают зональную скорость ионосферных неоднородностей на высоте максимума F2-слоя.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАДАРА

Ранее было приведено обсуждение выбора частотного диапазона для радара ИР-МСТ и показано, что не существует рабочей частоты, оптимальной для всех задач радара. Компромиссным решением является частотный диапазон ~150 МГц. Тем не менее, важно оценить возможности радара при работе на этой частоте в основных режимах работы.

При оценке потенциала для режимов МСТ, ИР-1 и ИР-2 можно отталкиваться от удельной эффективной площади рассеяния (ЭПР) единичного объема среды. Эта характеристика зависит только от параметров атмосферы, что позволяет получить вертикальный профиль ЭПР в атмосфере. С другой стороны, по техническим характеристикам радара можно найти минимальную ЭПР, при которой возможно определение какого-либо атмосферного параметра. Таким образом, можно найти высотный диапазон, в пределах которого возможно проведение измерений. Критерием качества оценки параметров атмосферы является желаемая статистическая точность полученных результатов. Поэтому центральной характеристикой при оценке потенциала является отношение сигнал/шум (SNR). Аналитиче-

ским путем либо моделированием можно найти SNR , требуемое для достижения нужной статистической точности. Далее приводятся результаты оценки потенциала для атмосферных режимов работы. Более подробно методика оценки потенциала и полученные результаты описаны в работе [Потехин и др., 2016]. При моделировании атмосферы использовались параметры моделей NRLMSIS-00 и IRI-2012.

Турбулентное рассеяние включает в себя большое число параметров атмосферы. В мезосфере оно возрастает из-за дополнительной ионизированной компоненты [Lübken, 2014]. Основным интересующим параметром служит скорость нейтрального ветра, поэтому SNR было задано таким образом, чтобы стандартное отклонение полученной скорости в тропосфере и стратосфере не превышало 1 м/с, в мезосфере — 2 м/с. При заданных параметрах моделирования радар ИР-МСТ позволит проводить измерения скорости нейтрального ветра в тропосфере и стратосфере на высотах до 25 км. В мезосфере в летнее время измерения возможны на высотах ~86 км при повышении числа Шмидта, характеризующего степень ослабления диффузии электронов из-за появления ионизированных ледяных частиц. Считается, что именно это является одной из причин возникновения летнего мезосферного эха. Также показана возможность наблюдения зимнего мезосферного эха, которое происходит на меньших высотах (~70 км) и не требует повышенного числа Шмидта. Именно в мезосфере проявляется преимущество частоты 50 МГц, используемой в большинстве МСТ-радаров — рассеяние в этом случае сильнее и охватывает значительно больший диапазон высот.

В ИР-измерениях внимание акцентировалось на определении электронной концентрации, температуры и скорости дрейфа плазмы. Считаем, что относительное стандартное отклонение при определении концентрации и температур не должно превышать 10 %, а стандартное отклонение скорости дрейфа плазмы — параметра, известного своей высокой дисперсией, не должно превышать 45 м/с. Моделирование показало возможность измерения этих параметров в режиме ИР-1 на всех рабочих высотах 100–500 км. В режиме ИР-2 измерения концентрации возможны на высотах немного более 1500 км, температуры — на высотах до 1320 км, скорости дрейфа плазмы — до 1140 км.

Чувствительность радара ИР-МСТ в режиме интерферометрических измерений можно оценить по максимуму производной коэффициента корреляции, когда наклон фазоугломестной характеристики интерферометра является наименее пологим. Было показано, что антенная система радара ИР-МСТ наиболее чувствительна к объектам с угловым размером 7.3 угл. мин, что достаточно для исследования тонкой структуры атмосферных неоднородностей.

Большой сектор обзора, высокая частота повторения импульсов, большая площадь антенны и излучаемая мощность делают радар ИР-МСТ хорошим средством мониторинга КО. По опыту радиолокации КО на ИРНР, радар ИР-МСТ подходит для измерения параметров орбит с точностью, необходи-

мой для прогноза следующего витка движения объекта. В настоящее время при измерении координатной информации КО на ИРНР среднеквадратичное отклонение по дальности составляет ~100–300 м, среднеквадратичное отклонение определения углов цели — ~2–5 угл. мин. Радар НР-МСТ обладает более совершенной конфигурацией, поэтому можно ожидать, что точность измерений будет выше.

Радиоастрономическая чувствительность одной антенной решетки при усреднении принятого сигнала в течение 0.1 с составляет $4.4 \cdot 10^{-26}$ Вт/(м²·Гц). Для наблюдения за радиоисточниками радар НР-МСТ обладает малым угловым разрешением и только одной протяженной базой, однако благодаря высокой чувствительности возможно измерение потока от мощных радиоисточников. Уникальность радара НР-МСТ для этой задачи состоит в рабочей частоте 158 МГц — в мире мало радиоастрономических инструментов с большой эффективной площадью антенны, работающих в метровом диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время для исследования процессов и явлений, происходящих в атмосфере и околоземном космическом пространстве, недостаточно инструментов, которые работают только в локальной области пространства или в малом диапазоне высот. Для полного представления требуются инструменты, охватывающие разные слои, частотные диапазоны и временные промежутки. Именно поэтому НГК РАН включает сразу несколько современных разноцелевых установок для исследования солнечно-земных связей. Среди них радар НР-МСТ позволяет охватить максимальный диапазон высот в атмосфере и получать параметры, которые невозможно определить с помощью других инструментов. Радар позволит решать актуальные фундаментальные задачи солнечно-земной физики, изучения динамики и волновой активности в нижней и средней атмосфере, магнитосферно-ионосферных связей и процессов переноса энергии в системе ионосфера—мезосфера—стратосфера—тропосфера. Кроме того, на регулярной основе будут отслеживаться КО и состояние солнечной активности в метровом диапазоне. Всеатмосферный радар НР-МСТ заполнит пробел в сети НР- и МСТ-радаров, покрывая регион Юго-Восточной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Потехин А.П., Сетов А.Г., Лебедев В.П. и др. Перспективный радар НР-МСТ: потенциал и диагностические возможности // *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 3. С. 3–16. DOI: [10.12737/19444](https://doi.org/10.12737/19444).
- Сетов А.Г., Глоба М.В., Медведев А.В., Васильев Р.В., Кушнарев Д.С. Первые результаты абсолютных измерений потока солнечного излучения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) // *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 24–27. DOI: [10.12737/szf-43201804](https://doi.org/10.12737/szf-43201804).
- Berngardt O.I., Kushnarev D.S. Effective subtraction technique at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar: Theory and experiment // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. V. 105–106. P. 293–298. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.03.023](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.03.023).
- Cho J.Y.N., Kelley M.C. Polar mesosphere summer radar echoes: observations and current theories // *Rev. Geophys.* 1993. V. 31, N 3. P. 243–265. DOI: [10.1029/93RG01535](https://doi.org/10.1029/93RG01535).

Ding Z., Wu J., Xu Z., Xu B., Dai L. The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements // *Earth, Planets and Space*. 2018. V. 70, iss. 1, article id. 87. 13 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0859-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0859-8).

Evans J.V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson Scatter Radar // *Proc. IEEE*. 1969. V. 59, N 4. P. 496–530. DOI: [10.1109/PROC.1969.7005](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7005).

Farley D.T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements // *Radio Sci.* 1972. V. 7, N 6. P. 661–666. DOI: [10.1029/RS007i006p00661](https://doi.org/10.1029/RS007i006p00661).

Hocking W.K. Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: A review // *Radio Sci.* 1985. V. 20, N 6. P. 1403–1422. DOI: [10.1029/RS020i006p01403](https://doi.org/10.1029/RS020i006p01403).

Hocking W.K. Recent advances in radar instrumentation and techniques for studies of the mesosphere, stratosphere and troposphere // *Radio Sci.* 1997. V. 32, N 6. P. 2241–2270. DOI: [10.1029/97RS02781](https://doi.org/10.1029/97RS02781).

Hocking W.K. A review of mesosphere—stratosphere—troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997–2008 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 848–882. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.12.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.12.009).

Khakhinov V.V., Lebedev V.P., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Capabilities of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar for space debris studies // *Proc. 5th European Conference on Space Debris*. Darmstadt, Germany. 2009. V. 5, N 1. 7 p.

Kirkwood S. Polar mesosphere winter echoes — A review of recent results // *Adv. Space Res.* 2007. V. 40. P. 751–757. DOI: [10.1016/j.asr.2007.01.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.024).

Latteck R., Singer W., Rapp M., et al. MAARSY: The new MST radar on Andøya — System description and first results // *Radio Sci.* 2012. V. 47. RS1006. DOI: [10.1029/2011RS004775](https://doi.org/10.1029/2011RS004775).

Lübken F.-J. Turbulent scattering for radars: a summary // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 107. P. 1–7. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.10.015).

Lübken F.-J., Latteck R., Becker E., Höffner J., Murphy D. Using polar mesosphere summer echoes and stratospheric/mesospheric winds to explain summer mesopause jumps in Antarctica // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016. V. 162. P. 106–115. DOI: [10.1016/j.jastp.2016.06.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.06.008).

McCrea I., Aikio A., Alfonsi L., et al. The science case for the EISCAT_3D radar // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2015. V. 2. DOI: [10.1186/s40645-015-0051-8](https://doi.org/10.1186/s40645-015-0051-8).

Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future // *Hist. Geo Space Sci.* 2019. V. 10. DOI: [10.5194/hgss-10-215-2019](https://doi.org/10.5194/hgss-10-215-2019).

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and digisonde data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. V. 105–106. P. 350–357. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.001).

Rapp M., Strelnikova I., Latteck R., et al. Polar mesosphere summer echoes (PMSE) studied at Bragg wavelength of 2.8 m, 67 cm, and 16 cm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 947–961. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.11.005).

Robinson R. New techniques and results from incoherent scatter radars // *URSI Radio Sci. Bull.* 2004. V. 2004, iss. 311. P. 79–94. DOI: [10.23919/URSIRSB.2004.7909637](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2004.7909637).

Sato K., Tsutsumi M., Sato T., et al. Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 118. P. 2–15. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.08.022](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.022).

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. V. 49, N 7. P. 1028–1033. DOI: [10.1134/S0016793209070317](https://doi.org/10.1134/S0016793209070317).

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // *Radio Sci.* 2004. V. 39. RS3001. DOI: [10.1029/2001RS002523](https://doi.org/10.1029/2001RS002523).

Streltsov A.V., Bertheliet J.-J., Chernyshov A.A., et al. Past, present and future of active radio frequency experiments in space //

Space Sci Rev. 2018. V. 214, N 118. DOI: [10.1007/s11214-018-0549-7](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7).

Tashlykov V., Setov A., Medvedev A., Lebedev V., Kushnarev D. Ground clutter deducting technique for Irkutsk Incoherent Scatter Radar // Proc. 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). 2019. P. 175–178. DOI: [10.1109/RWP.2019.8810369](https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810369).

Vasilyev R., Globa M., Kushnarev D., et al. Spectral characteristics of ionospheric scintillations of VHF radiosignal near magnetic zenith // J. Atmos Solar-Terr. Phys. 2017. V. 160. P. 48–55. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.05.016).

Yeh K.C., Liu C.-H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proc. IEEE. 1982. V. 70, N 4. P. 324–360. DOI: [10.1109/PROC.1982.12313](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12313).

Zeller O., Zecha M., Bremer J., et al. Mean characteristics of mesosphere winter echoes at mid- and high latitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 1087–1104. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.015).

Zrnich D. Estimation of spectral moments for weather echoes // IEEE Trans. Geosci. Electronics. 1979. V. GE-17, N 4. P. 113–128. DOI: [10.1109/TGE.1979.294638](https://doi.org/10.1109/TGE.1979.294638).

REFERENCES

Bergardt O.I., Kushnarev D.S. Effective subtraction technique at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar: Theory and experiment. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 105–106, pp. 293–298. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.03.023](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.03.023).

Cho J.Y.N., Kelley M.C. Polar mesosphere summer radar echoes: observations and current theories. *Rev. Geophys.* 1993, vol. 31, no. 3, pp. 243–265. DOI: [10.1029/93RG01535](https://doi.org/10.1029/93RG01535).

Ding Z., Wu J., Xu Z., Xu B., Dai L. The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements. *Earth, Planets and Space.* 2018, vol. 70, iss. 1, article id. 87, 13 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0859-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0859-8).

Evans J.V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson Scatter Radar. *Proc. IEEE.* 1969, vol. 59, no. 4, pp. 496–530. DOI: [10.1109/PROC.1969.7005](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7005).

Farley D.T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements. *Radio Sci.* 1972, vol. 7, no. 6, pp. 661–666. DOI: [10.1029/RS007i006p00661](https://doi.org/10.1029/RS007i006p00661).

Hocking W.K. Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: A review. *Radio Sci.* 1985, vol. 20, no. 6, pp. 1403–1422. DOI: [10.1029/RS020i006p01403](https://doi.org/10.1029/RS020i006p01403).

Hocking W.K. Recent advances in radar instrumentation and techniques for studies of the mesosphere, stratosphere and troposphere. *Radio Sci.* 1997, vol. 32, no. 6, pp. 2241–2270. DOI: [10.1029/97RS02781](https://doi.org/10.1029/97RS02781).

Hocking W.K. A review of mesosphere—stratosphere—troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997–2008. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, pp. 848–882. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.12.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.12.009).

Khakhinov V.V., Lebedev V.P., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Capabilities of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar for space debris studies. *Proc. 5th European Conference on Space Debris.* Darmstadt, Germany. 2009, vol. 5, no. 1, 7 p.

Kirkwood S. Polar mesosphere winter echoes — A review of recent results. *Adv. Space Res.* 2007, vol. 40, pp. 751–757. DOI: [10.1016/j.asr.2007.01.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.024).

Latteck R., Singer W., Rapp M., Vandepier B., Renkwitz T., Zecha M., Stober G. MAARSY: The new MST radar on Andøya — System description and first results. *Radio Sci.* 2012, vol. 47, RS1006. DOI: [10.1029/2011RS004775](https://doi.org/10.1029/2011RS004775).

Lübken F.-J. Turbulent scattering for radars: A summary. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 107, pp. 1–7. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.10.015).

Lübken F.-J., Latteck Ralph, Becker E., Höffner J., Murphy D. Using polar mesosphere summer echoes and stratospheric/mesospheric winds to explain summer mesopause jumps in Antarctica. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 162, pp. 106–115. DOI: [10.1016/j.jastp.2016.06.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.06.008).

McCrea I., Aikio A., Alfonsi L., Belova E., Buchert S., Clilverd M., et al. The science case for the EISCAT_3D radar. *Progress in Earth and Planetary Science.* 2015, vol. 2. DOI: [10.1186/s40645-015-0051-8](https://doi.org/10.1186/s40645-015-0051-8).

Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future. *Hist. Geo Space Sci.* 2019, vol. 10. DOI: [10.5194/hgss-10-215-2019](https://doi.org/10.5194/hgss-10-215-2019).

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and digisonde data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 105–106, pp. 350–357. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.001).

Potekhin A.P., Setov A.G., Lebedev V.P., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Prospective IS-MST radar. Potential and diagnostic capabilities. *J. Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, no. 3, pp. 3–21. DOI: [10.12737/22281](https://doi.org/10.12737/22281).

Rapp M., Strelnikova I., Latteck R., Hoffmann P., Hoppe U.-P., Häggström I., Rietveld M.T. Polar mesosphere summer echoes (PMSE) studied at Bragg wavelength of 2.8 m, 67 cm, and 16 cm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, pp. 947–961. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.11.005).

Robinson R. New Techniques and Results from Incoherent Scatter Radars. *URSI Radio Sci. Bull.* 2004, vol. 2004, iss. 311, pp. 79–94. DOI: [10.23919/URSIRSB.2004.7909637](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2004.7909637).

Sato K., Tsutsumi M., Sato T., Nakamura T., Saito A., Tomikawa Y., et al. Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 118, pp. 2–15. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.08.022](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.022).

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-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, no. 3, pp. 24–27. DOI: [10.12737/stp-43201804](https://doi.org/10.12737/stp-43201804).

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2009, vol. 49, no. 7, pp. 1028–1033. DOI: [10.1134/S0016793209070317](https://doi.org/10.1134/S0016793209070317).

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization. *Radio Sci.* 2004, vol. 39, RS3001. DOI: [10.1029/2001RS002523](https://doi.org/10.1029/2001RS002523).

Streltsov A.V., Bertheliet J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., et al. Past, present and future of active radio frequency experiments in space. *Space Sci Rev.* 2018, vol. 214, no. 118. DOI: [10.1007/s11214-018-0549-7](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7).

Tashlykov V., Setov A., Medvedev A., Lebedev V., Kushnarev D. Ground clutter deducting technique for Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Proc. 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP).* 2019, pp. 175–178. DOI: [10.1109/RWP.2019.8810369](https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810369).

Vasilyev R., Globa M., Kushnarev D., Medvedev A., Ratovsky K. Spectral characteristics of ionospheric scintillations of VHF radiosignal near magnetic zenith. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 160, pp. 48–55. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.05.016).

Yeh K.C., Liu C.-H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proc. the IEEE.* 1982, vol. 70, no. 4, pp. 324–360. DOI: [10.1109/PROC.1982.12313](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12313).

Zeller O., Zecha M., Bremer J., Latteck R., Singer W. Mean characteristics of mesosphere winter echoes at mid- and high latitudes. *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, pp. 1087–1104. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.015).

Zrnich D. Estimation of spectral moments for weather echoes. *IEEE Trans. Geosci. Electronics.* 1979, vol. GE-17, no. 4, pp. 113–128. DOI: [10.1109/TGE.1979.294638](https://doi.org/10.1109/TGE.1979.294638).

Как цитировать эту статью:

Медведев А.В., Потехин А.П., Сетов А.Г., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П. Всеатмосферный радар ИР-МСТ. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 2. С. 51–60. DOI: [10.12737/szf-62202004](https://doi.org/10.12737/szf-62202004).