
**ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РАДАР ИР-МСТ:
ПОТЕНЦИАЛ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ**

PROSPECTIVE IS-MST RADAR. POTENTIAL AND DIAGNOSTIC CAPABILITIES

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

Аннотация. В ближайшие годы в районе Иркутска планируется строительство радара, сочетающего в себе возможности радаров некогерентного рассеяния (НР) и мезосферно-стратосферно-тропосферных радаров (МСТ) [Жеребцов и др., 2011]. Радар ИР-МСТ представляет собой фазированную решетку, состоящую из двух разнесенных антенных полотен, с цифровой многоканальной приемной системой, позволяющей проводить детальную пространственно-временную обработку сигнала обратного рассеяния. Показаны характеристики, конфигурация и возможности антенной и приемопередающей систем радара. Оценивается потенциал радара в основных режимах работы, включающих исследование ионосферы методом НР на высотах более ~100 км и изучение атмосферы с помощью сигналов, рассеянных на флуктуациях показателя преломления, вызванных атмосферными турбулентными неоднородностями, на высотах до 100 км.

Моделирование показало, что радар позволит проводить регулярные измерения параметров нейтральной атмосферы на высотах до 26 км, а также наблюдать мезосферное летнее эхо на высотах ~85 км в присутствии заряженных ледяных частиц (при увеличении числа Шмидта) и мезосферное зимнее эхо на высотах ~65 км при повышении фоновой электронной концентрации. Оценка возможностей радара при работе в режиме НР в высотных диапазонах 100–600 и 600–2000 км показала, что в дневных условиях при накоплении 10 мин верхняя граница определения электронной концентрации и температуры ионосферной плазмы составляет ~1500 и ~1300 км соответственно при стандартном отклонении не более 10 %. Верхний предел определения скорости дрейфа составляет ~1100 км при стандартном отклонении 45 м/с. Оценка интерферометрических возможностей

Abstract. In the next few years, a new radar is planned to be built near Irkutsk. It should have capabilities of incoherent scatter (IS) radars and mesosphere-stratosphere-troposphere (MST) radars [Zherebtsov et al., 2011]. The IS-MST radar is a phased array of two separated antenna panels with a multichannel digital receiving system, which allows detailed space-time processing of backscattered signal. This paper describes characteristics, configuration, and capabilities of the antenna and transceiver systems of this radar. We estimate its potential in basic operating modes to study the ionosphere by the IS method at heights above 100 km and the atmosphere with the use of signals scattered from refractive index fluctuations, caused by turbulent mixing at heights below 100 km.

The modeling shows that the radar will allow us to regularly measure neutral atmosphere parameters at heights up to 26 km as well as to observe mesosphere summer echoes at heights near 85 km in the presence of charged ice particles (an increase in Schmidt number) and mesosphere winter echoes at heights near 65 km with increasing background electron density. Evaluation of radar resources at the IS mode in two height ranges 100–600 and 600–2000 km demonstrates that in the daytime and with the accumulation time of 10 min, the upper boundaries of electron density and ionospheric plasma temperature are ~1500 and ~1300 km respectively, with the standard deviation of no more than 10 %. The upper boundary of plasma drift velocity is ~1100 km with the standard deviation of 45 m/s. The estimation of interferometric capabilities of the MST radar shows that it has a high sensitivity to objects of angular size near 7.5 arc min, and its potential accuracy in determining target angles can reach 40 arc sec.

радара показала, что он обладает высокой чувствительностью к угловым размерам объекта порядка 7.5 угл. мин, а потенциальная точность определения углов цели может достигать 40 угл. сек.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, МСТ-радар, фазированная решетка, потенциал атмосферных радаров, ионосфера, атмосфера.

Keywords: incoherent scatter radar, MST radar, phased array, atmospheric radar potential, ionosphere, atmosphere.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта Национального гелиогеофизического комплекса планируется создание радара для комплексного исследования атмосферы. Высокая мощность излучения и большая апертура нового радара позволят изучать ионосферу методом некогерентного рассеяния (НР) и нейтральную атмосферу на высотах мезосферы — стратосферы — тропосферы (МСТ). Разработка радара осуществляется Радиотехническим институтом им. акад. Минца (РТИ), имеющим опыт проектирования радиолокационных установок. Проект радара основан на конструкции существующих установок, разработанных РТИ, и модифицируется в соответствии с задачами исследования атмосферы. Необходимо изучить конструктивные особенности нового радара НР-МСТ и оценить его научный потенциал.

Основной задачей радара НР-МСТ является исследование структуры и динамики нейтральной атмосферы и ионосферы, а также взаимодействий между ними. Наблюдения нейтральной атмосферы включают измерение полного вектора скорости ветра, параметров турбулентности и атмосферных слоев на высотах тропосферы, стратосферы и мезосферы. Особый интерес представляют мезосферные эхосигналы [Rapp, Lubken, 2004], которые появляются в летнее и зимнее время, иногда сопровождаясь видимыми серебристыми облаками [Romejko et al., 2003]. МСТ-измерения включают также исследования метеоритов на высотах мезосферы и нижней термосферы, рассеяния на тепловых флуктуациях плазмы, атмосферных гравитационных волн и отражающих атмосферных слоев [Hocking, 2011]. Метод НР позволяет получать параметры ионосферной плазмы: электронную концентрацию, температуры ионов и электронов, ионный состав, скорость дрейфа плазмы — на высотах 100–2000 км и наблюдать ионосферные неоднородности, когерентные эхосигналы, D-слой ионосферы. Таким образом, радар позволит исследовать физические процессы и связи в системе «нейтральная атмосфера — ионосфера — плазмосфера». В задачи радара входят также интерферометрические наблюдения тонкой структуры атмосферных неоднородностей и сосредоточенных целей (спутников, космического мусора и метеоритов), пассивные радиоастрономические наблюдения Солнца и космических радиоисточников. Национальный гелиогеофизический комплекс включает ряд оптических инструментов, которые будут размещаться рядом с радаром НР-МСТ и позволят расширить его диагностические возможности. Так,

наблюдения нижней и средней атмосферы совместно с лидарными измерениями позволяют исследовать процессы переноса [Bertin et al., 2001].

Всего в мире насчитывается около десяти радаров НР и двадцать крупных МСТ-радаров. За последние пять лет введены в строй такие инструменты, как МСТ-радар MAASRY в Норвегии [Latteck et al., 2012] и МСТ/НР-радар PANSY в Антарктиде [Sato et al., 2014]. Планируется создание многофункционального радара EISCAT-3D [McCrea et al., 2015]. По своим техническим характеристикам радар НР-МСТ не должен уступать современным установкам мирового уровня. В настоящее время планируется разместить радар вблизи о. Байкал, что позволит исследовать атмосферу и ионосферу над Восточной Сибирью — регионом, где раньше не было диагностического инструмента со столь широким высотным охватом, и дополнить мировую сеть радаров. Кроме того, это даст возможность осуществлять экологический мониторинг атмосферы вблизи озера.

В статье рассматриваются конфигурация антенны и характеристики приемопередающей системы радара, оцениваются рабочий диапазон высот, потенциал при работе в режимах МСТ- и НР-наблюдений и возможности интерферометрических и радиоастрономических исследований.

КОНФИГУРАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДАРА

Антенная система радара НР-МСТ состоит из двух фазированных решеток (антенных полотен), расположенных вдоль магнитного меридиана на удалении 100 м друг от друга и наклоненных в северном и южном направлении на 20° (рис. 1). Каждое антенное полотно имеет размеры 40×40 м и включает 1536 крест-вибраторов, расположенных в узлах треугольной сетки. Сектор обзора каждого антенного полотна составляет ±45°, а общий сектор обзора радара равен ±65° в направлении север — юг и ±45° в направлении восток — запад относительно магнитного меридиана. Следует учесть, что при качении луча фазированной решетки происходит расширение луча и уменьшение коэффициента усиления, поэтому для данной конфигурации радара потенциал повышен в направлении 20° относительно горизонта и понижен при вертикальном направлении луча. В приемной системе обрабатываются сигналы двух поляризаций. В режиме излучения сигнал имеет линейную поляризацию, что позволит измерять абсолютную электронную концентрацию на основе метода фарадеевских замираний [Shpynev, 2004].

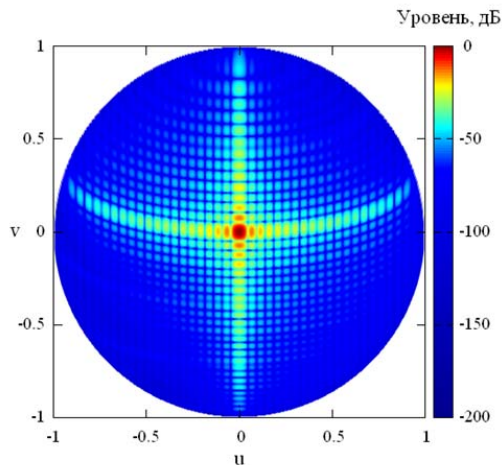
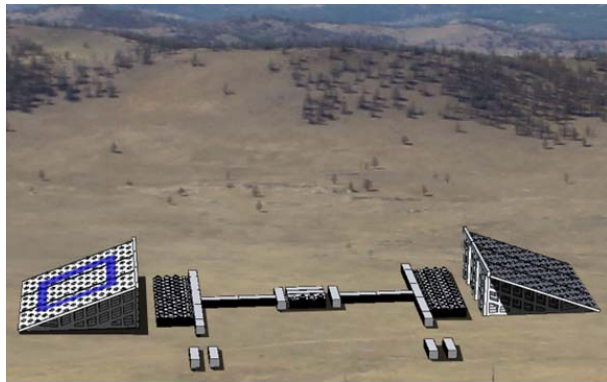


Рис. 1. Радар НР-МСТ (вверху) и диаграмма направленности решетки. Наклон решетки скомпенсирован качанием луча на 20° для обеспечения вертикальных измерений

Местоположение радара выбиралось таким образом, чтобы уменьшить радиогоризонт — расстояние до ближайших препятствий, способных создать местный помеховый отраженный сигнал. Это необходимо, чтобы уменьшить минимальное расстояние, на котором возможно измерение характеристик среды. Остаточные местные помехи будут компенсироваться специальной обработкой сигналов.

В табл. 1 представлены основные характеристики радара НР-МСТ. Частота повторения импульсов PRF , скважность q и длительность импульса $\tau_{и}$ определяются выбранными режимами работы: МСТ — в высотном интервале 5–100 км, НР-1 — 100–600 или НР-2 — 600–2000 км. Данные высотные интервалы приведены в качестве примера, а реальные будут задаваться в соответствии с научной задачей. Так, при проведении измерений в нижней и средней атмосфере нет необходимости в высокой частоте повторения импульсов, поскольку ширина доплеровского спектра МСТ-сигналов не превышает 50 Гц, что позволяет работать по нескольким направлениям одновременно и проводить дополнительное когерентное накопление сигнала для увеличения соотношения сигнал/шум.

Каждое антенное полотно разбито на 12 фрагментов, состоящих из 128 крест-вибраторов и подключенных к отдельным приемопередающим модулям. В модуле происходит частичное диаграммообразование для сигналов, принятых с 128 антенн, в результате чего

Таблица 1

Характеристики радара НР-МСТ

Характеристика	Обозначение	Значение
диапазон рабочих частот	f	154–162.7 МГц
конфигурация радара	—	2 квадратных решетки 40×40 м
тип антенны	—	Крест-вибратор
число излучателей	N_t	3072
пиковая мощность	P_t	2 МВт
эффективная площадь антенны (2 решетки)	A_e	2500 м^2
средний уровень боковых лепестков	—	–35 дБ
шумовая температура	T_e	~500 К
ширина луча	$\theta_{0.5}$	$2.5 \times 2.5^\circ$ (1 решетка)
ширина полосы приемника	ΔB	625 кГц
длина дискрета широкополосного импульса	τ_d	3.2 мкс
минимальное разрешение по высоте	Δr	480 м
частота повторения импульсов (режим МСТ/НР-1/НР-2)	PRF	1333.3/250/75 Гц
длительность импульса (режим МСТ/НР-1/НР-2)	$\tau_{и}$	51.2/700/6500 мкс
скважность (режим МСТ/НР-1/НР-2)	q	6.8/17.5/37.5 %
произведение средней мощности на эффективную площадь	$P_{ср} \cdot A_e$	$3.4 \cdot 10^8 / 8.75 \cdot 10^8 / 18.75 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$
сектор обзора	—	$\pm 45^\circ$

получаются четыре выходных приемных канала (по две поляризации и квадратуры), доступных для дальнейшей обработки. Таким образом, каждая антенная решетка радара позволит сформировать один узкий луч $2.5 \times 2.5^\circ$ на излучение и 12 широких независимых приемных лучей (в 12 раз шире). Приемные лучи формируются фазовыми центрами, разнесенными по поверхности антенного полотна, а сами полотна находятся на расстоянии 100 м друг от друга. Это даст возможность комбинировать сигналы с отдельных приемных каналов для повышения отношения сигнал/шум, получения пучка узких приемных лучей и проведения интерферометрических наблюдений.

Излучаемый сигнал формируется в цифровом синтезаторе, переносится на промежуточную частоту и переводится в аналоговую форму, после чего разветвляется на все передатчики, где фазируется в соответ-

ствии с требуемым направлением. Фазирование в передающей системе осуществляется 4-битовыми аналоговыми фазовращателями с дискретом фазы 22.5° . Выбранный шаг квантования фазы аналогового фазовращателя приводит к снижению коэффициента усиления на 0.06 дБ и повышению уровня боковых лепестков. Сигналы синхронизации также формируются единым гетеродином и разветвляются на все приемопередающие модули, поэтому радар когерентен по фазе относительно передаваемых и принимаемых радиоимпульсов.

Приемная система, в отличие от передающей, является полностью цифровой: сигналы каждой поляризации с антенн усиливаются в малощумящем усилителе, фильтруются и оцифровываются. Это обеспечивает широкий динамический диапазон (менее 83 дБ), позволяющий принимать как слабые сигналы некогерентного рассеяния, так и мощные когерентные сигналы от нейтральной и ионизированной атмосферы. Выбор динамического диапазона определяет также минимальную рабочую высоту, поскольку мощные местные помехи приводят к насыщению в приемном тракте, что препятствует их фильтрации. Принятые цифровые сигналы разделяются на квадратуры, фазируются и частично суммируются, образуя 12 каналов с каждой решетки в двух поляризациях и двух квадратурах (всего 96 цифровых каналов). Кроме того, приемопередающая система позволит задавать произвольное амплитудно-фазовое распределение в антенном полотне для сигналов с подрешеток из 16 крест-вибраторов, поэтому возможно получение диаграмм направленности (ДН) с малым уровнем боковых лепестков или нулевым в выборочном направлении излучения и приема.

На рис. 1 представлена ДН для одного антенного полотна (1536 элементов) в плоскости земли. ДН построена по классическому методу, в основе которого лежит представление всего антенного поля одним фазовым центром, что позволяет уменьшить время вычисления. При этом не учитывается взаимное влияние между антеннами, которое приводит к искажению ДН отдельных элементов решетки. Для компенсации физического наклона решетки элементы полотна сфазированы таким образом, чтобы главный лепесток был направлен вертикально. ДН обладает несимметричной изогнутой формой из-за треугольного расположения элементов и преобразования координат к плоскости земли. В дальнейшем будет проводиться более точное моделирование ДН, учитывающее поле отдельных антенн и взаимодействие между ними.

Характеристики современных НР-радаров можно найти, например, в [Медведев, 2014]. В большинстве этих радаров, построенных еще до 2000 г., используются параболические антенны с коэффициентами усиления больше 40 дБ и ламповые передатчики мощностью 1–5 МВт. Некоторые МСТ-радары перечислены в [Hocking, 1997]. К ним стоит добавить такие современные радары, как EAR, MAARSY и PANSY. В отличие от НР-радаров, практически все они представляют собой многолучевые фазированные решетки, что, скорее всего, обусловлено менее

жесткими требованиями к мощности излучаемого сигнала. Благодаря развитию и удешевлению цифровых интегральных устройств, преимущество фазированных решеток, позволяющих быстро изменять направление луча, исследовать несколько направлений одновременно и менять форму ДН различных амплитудно-фазовых распределений, становится очевидным. Радар НР-МСТ, имеющий пиковую мощность 2 МВт, апертуру 80×40 м и цифровую антенную систему, позволит проводить наблюдение атмосферы на уровне мировых установок. В настоящее время для исследования ионосферы в Институте солнечно-земной физики СО РАН используется Иркутский радар НР [Жеребцов и др., 2002; Потехин и др., 2008], основные недостатки которого — невозможность проведения измерений на высотах до 150–200 км и фиксированный период повторения импульсов (24.4 Гц). Место расположения нового радара выбиралось с учетом требования малого радиогоризонта, поэтому он не будет обладать подобными недостатками. Уникальность установки также состоит в разнесении двух антенных полотен на расстоянии 100 м и наклоне вдоль магнитного меридиана. Такое положение решеток позволит проводить интерферометрические наблюдения и исследовать вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности. Стоит отметить, что в настоящее время в мире существуют всего две установки, работающие на частоте 158 МГц: Харьковский и Иркутский радары, построенные по схожей схеме.

ПОТЕНЦИАЛ РАДАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НИЖНЕЙ, СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Приоритетными задачами радара являются диагностика динамических процессов в верхней, средней и нижней атмосфере, исследование вариаций параметров ионосферной плазмы и изучение взаимодействий в системе «атмосфера — ионосфера — плазмосфера». Следовательно, необходимо, чтобы радар охватывал широкий высотный диапазон. При этом параметры среды по мере роста высоты значительно изменяются и для диагностики атмосферы должны использоваться различные методы. Основные источники эхо-сигналов в этом диапазоне — некогерентное рассеяние на тепловых флуктуациях ионосферной плазмы и брегговское когерентное рассеяние на турбулентных флуктуациях в области мезосферы — стратосферы — тропосферы, иногда также называемое когерентным рассеянием в нейтральной атмосфере.

Режимы работы радара НР-МСТ показаны на рис. 2. Разделение радара на два разнесенных антенных полотна позволяет ускорить процесс сканирования атмосферы в разных направлениях в случаях, когда мощность сигналов обратного рассеяния велика (например, при зондировании высотного интервала 100–600 км в режиме НР-1). Выше 600 км в ионосфере (режим НР-2) требуется одновременная работа двух решеток в одном направлении для повы-

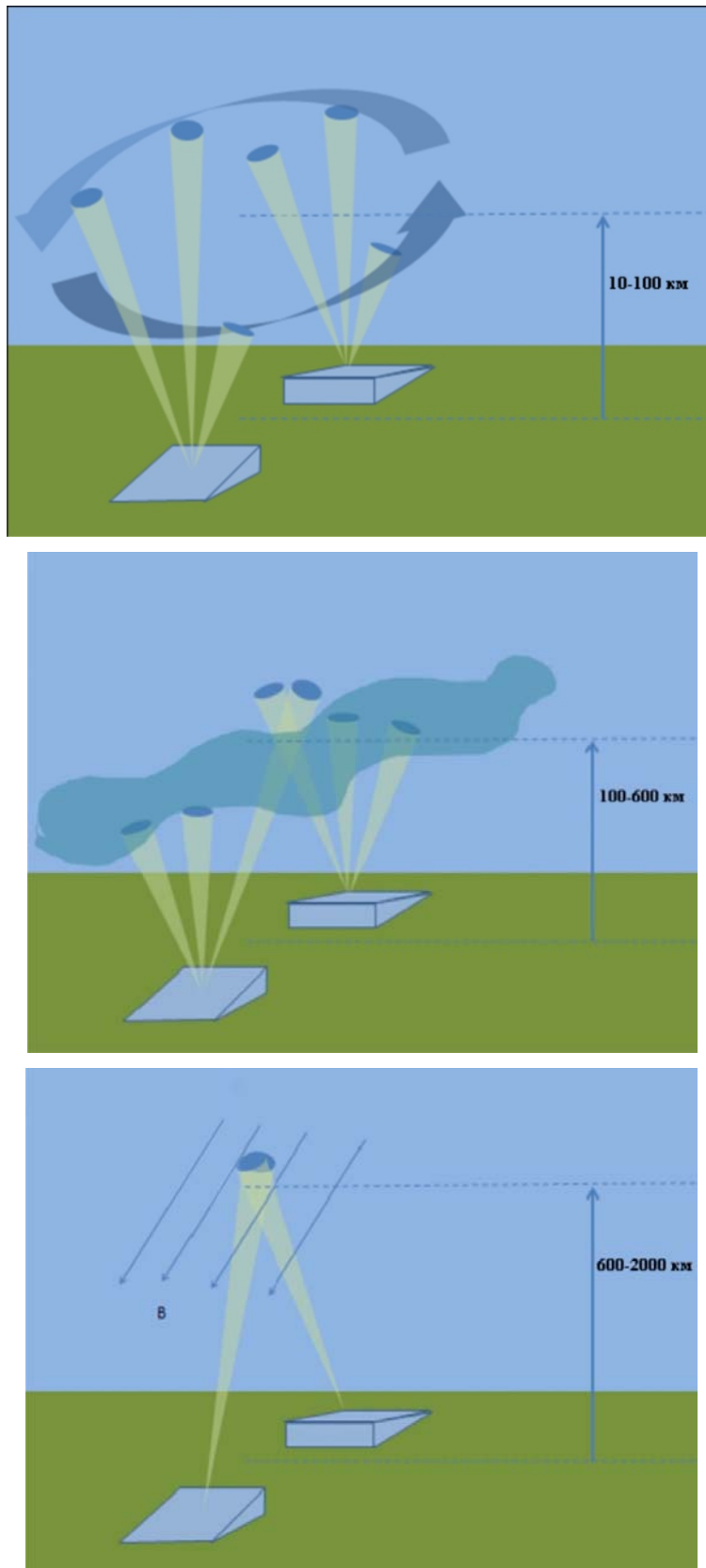


Рис. 2. Схематичное изображение режимов работы радара НР-МСТ. Сверху вниз: режимы МСТ, НР-1, НР-2

вышения потенциала радара. Радар НР-МСТ имеет линейную поляризацию излучаемого сигнала, что позволит получать профиль электронной концентрации в ионосфере как на основе фарадеевского вращения [Shrynev, 2004], так и по абсолютным измерениям рассеянной мощности. Режимы МСТ и

НР-1 позволят исследовать несколько направлений с временным разрешением, достаточным для определения полного вектора скорости движения атмосферы, ионосферного дрейфа и нейтрального ветра, а также для детального изучения атмосферных неоднородностей.

В нижней и средней атмосфере для каждого излученного импульса в каждом высотном интервале, равном разрешению по высоте, получают одиночную комплексную выборку для дальнейшей обработки. Сигналы на этих высотах обладают временем когерентности ~ 0.1 с, поэтому частота следования импульсов может быть небольшой (десятки и сотни герц), но длительность измерений должна быть достаточной для обеспечения необходимого разрешения по частоте (десятки секунд). В целом с ростом высоты ширина спектра сигналов обратного рассеяния увеличивается и сигналы, приходящие от разных импульсов, теряют когерентность. В связи с этим для полноценной обработки данных необходимо чаще получать выборки сигналов, приходящих с одного и того же высотного интервала (повысить частоту следования импульсов). Кроме того, чем дальше находится исследуемая область, тем реже можно посылать импульсы, чтобы не возникало неопределенностей по дальности. При этом разрешение по дальности необходимо поддерживать малым, т. е. использовать короткие импульсы либо применять сложные широкополосные сигналы вплоть до высоты ~ 100 км, где атмосферные процессы характеризуются меньшими масштабами. Эти масштабы, в свою очередь, зависят от скорости изменения параметров атмосферы с высотой (шкалы высот) и протяженности атмосферных неоднородностей и волновых возмущений в плоскости, перпендикулярной лучу радара. Таким образом, на высотах слоев D и E необходимо использовать специальные многоимпульсные режимы передачи [Farley, 1972] из-за жестких требований к разрешению по частоте и дальности. Начиная с высот 100–200 км требования к ширине импульса смягчаются, сигнал становится более некогерентным и для каждого высотного интервала возможно получение необходимого количества выборок за время следования одного импульса. Сложности, связанные с обработкой сигналов, могут усугубляться состоянием самой среды. На некоторых высотах возмущенность атмосферы становится недостаточной для получения эхо-сигналов и оценки параметров среды, что усложняет задачу исследования связей между разными атмосферными слоями и делает ее зависимой от вариаций среды.

Большинство МСТ-радаров работает в диапазоне частот 45–55 МГц [Fukao et al., 1990; Hocking, 1997; Latteck et al., 2012; Sato et al., 2014]. Диапазон исследуемых высот 2–30 км соответствует регулярным наблюдениям тропосферы и нижней стратосферы, а в диапазоне 60–95 км ведутся наблюдения мезосферы, в том числе мезосферных эхо-сигналов. Из-за затухания малых турбулентных неоднородностей в мезосфере мощность рассеянного сигнала падает с ростом рабочей частоты радара, что может повлиять на частоту наблюдения мезосферных эхо-сигналов. Тем не менее мезосферные эхо-сигналы, хоть и значительно ослабленные, наблюдались даже на радарх с частотой 930 МГц [Rapp et al., 2008]. Рабочая частота радара НР-МСТ составляет ~ 158 МГц, поэтому необходимо оценить зависимость мощности сигналов, рассеянных на турбулентных неоднородностях, от частоты.

Методика оценки потенциала

Диапазон высот, которые позволяет исследовать радар, можно оценить, сравнивая мощность сигнала обратного рассеяния с чувствительностью радара. Удобнее использовать удельную эффективную площадь рассеяния (ЭПР) единичного объема среды $\sigma_{\text{ср}}$ [1/м], которая зависит только от параметров атмосферы. Тогда чувствительность радара определяется минимальной удельной ЭПР $\sigma_{\text{мин}}$, которой должна обладать атмосфера для получения заданной статистической достоверности оценки параметров среды. Если $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}} > 1$, то проведение измерений на данной высоте возможно. Параметр $\sigma_{\text{мин}}$ находится из основного радиолокационного уравнения для случая объемного рассеяния [Bowles et al., 1962]:

$$P_r = \frac{P_t L \sigma \tau c \lambda^2}{128 \pi^3 R^2} \iint_{\theta, \phi} G^2(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi, \quad (1)$$

где P_t — пиковая излучаемая мощность, L — потери в системе радара и при распространении сигнала в атмосфере, τ — длительность зондирующего импульса, R — расстояние до центра рассеивающего объема, $G(\theta, \phi)$ — коэффициент усиления антенны в направлении (θ, ϕ) . Квадрату коэффициента усиления G^2 , учитывающему прием и излучение одной и той же антенной системой, соответствует двуправленная ДН шириной $1.8 \times 1.8^\circ$ для одного сегмента радара. В данном случае σ определяет долю изотропно рассеиваемой мощности на единицу рассеивающего объема.

Принятую мощность P_r выразим через отношение сигнал/шум S/N :

$$P_r = k T \Delta B S / N, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана, T — шумовая температура радара, ΔB — полоса рабочих частот приемника. Предполагается, что в приемнике присутствует только белый тепловой шум радара и отсутствуют местные помехи (считается, что они исключены после обработки данных). С учетом того, что шумовые характеристики известны, отношение S/N определяет уровень сигнала, требуемый для достижения статистической достоверности измерений, например для ограничения дисперсии оценки параметров среды в заданных пределах.

Интеграл в (1), учитывающий форму ДН, можно аппроксимировать гауссовой кривой для случая антенной решетки с квадратной апертурой [Hagen, Baumgartner, 1996]:

$$\iint_{\theta, \phi} G^2(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi = 0.44 \frac{(4\pi)^2 A_e}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$\sigma_{\text{мин}} = 18.2 \frac{\pi R^2 k T \Delta B S / N}{P_t L \tau c A_e \cos^3 \theta}, \quad (4)$$

где $\cos^3 \theta$ учитывает потери при качании луча ($\cos \theta$ из-за уменьшения проекции апертуры и $\cos^2 \theta$ как оценка ДН одного крест-вибратора). На данном этапе создания радара НР-МСТ потери L не известны. Обычно они уточняются на этапе калибровки радара. В дальнейших вычислениях примем $L=0.25$.

В случае рассеяния на турбулентных неоднородностях $\sigma_{\text{ср}}$ вычисляется по формуле [Lübken, 2014]. Для расчета атмосферных параметров используются модель нейтральной атмосферы NRLMSIS-00 и модель ионосферы IRI-2012. Интенсивность турбулентности, определяемая скоростью диссипации турбулентной энергии ϵ , задана равной $10^{-3} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в тропосфере, $10^{-5} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в стратосфере и $10^{-1} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в мезосфере, что соответствует умеренным возмущениям [Hocking, 1985; Watkins et al., 1988; Kantha, Hocking, 2011; Gavrilo, 2013]. Предполагается, что параметры нейтральной атмосферы будут оцениваться по задержкам автокорреляционной функции. Основным измеряемым параметром в нижней и средней атмосфере является скорость ветра, поэтому отношение сигнал/шум в (4) задается таким образом, чтобы стандартное отклонение при определении скорости не превышало 1 м/с в стратосфере — тропосфере и 2 м/с в мезосфере. Выражения для дисперсии оценки скорости по фазе автокорреляционной функции взяты из [Zgnic, 1979].

Потенциал при исследовании тропосферы — стратосферы

На MST-радаров проводятся регулярные измерения параметров сигналов, рассеянных на турбулентных флуктуациях среды [Hocking, 2011]. Турбулентное перемешивание нейтральной составляющей в стратосфере и тропосфере приводит к появлению градиента показателя преломления. Рассеяние происходит на флуктуациях показателя преломления с характерными масштабами, равными половине длины падающей волны (условие Брегга). Удельная ЭПР $\sigma_{\text{ср}}$ флуктуаций показателя преломления, вызванных турбулентными неоднородностями в атмосфере, зависит от рабочей частоты радара, формы спектра турбулентных флуктуаций и параметров атмосферы [Hocking, 1985]. Энергетический спектр турбулентностей делится на длинноволновый интервал, где происходит основная генерация энергии, интервал инерции, где энергия медленно убывает, и интервал вязкости, где турбулентности резко затухают, а энергия преобразуется в тепло. Высота перехода между интервалами инерции и вязкости зависит от частоты. Так, для радаров метрового диапазона переход наступает на высотах более 40 км [Hocking, 1985]. В средней и верхней стратосфере, где параметры атмосферы меняются медленно и интенсивность турбулентностей мала, мощность рассеянного сигнала падает, что приводит к исчезновению эхо-сигналов на высотах 30–60 км. Важная особенность измерений в нижней и средней атмосфере в вертикальном направлении — наличие мощных когерентных отражений от горизонтальных протяженных слоев. Эти эхо-сигналы обладают узким спектром шириной менее 1 Гц и чувствительностью к углу наклона сканирующего луча. Далее будет оценен потенциал радара при рассеянии исключительно на турбулентных флуктуациях.

На рис. 3 показано отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ в тропосфере и стратосфере для трех рабочих частот: 50 МГц (стандартная частота MST-радаров), 158 МГц (частота радара HP-MST) и 233 МГц (частота радара

EISCAT VHF). Последняя частота выбрана в связи с тем, что на радаре EISCAT VHF, который обладает сравнительно низкой для HP-радаров рабочей частотой (233 МГц), также проводились MST-наблюдения [Strelnikova, Rapp, 2010]. Поскольку для режима работы в нижней атмосфере нет особых требований к мощности излучения, на рис. 3 указано также отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ при работе с одним антенным полотном, что позволит улучшить временное разрешение. При моделировании были заданы следующие характеристики: $\tau_{\text{и}}=7$ мкс, $PRF=1000$ Гц, длительность накопления 20 с, ширина доплеровского спектра 5 Гц. При моделировании изменялись только частота радара и эффективная температура, но не размер апертуры. Видно, что при оценке скорости ветра в тропосфере и нижней стратосфере повышение частоты позволяет увеличивать потенциал (прежде всего — разрешение по времени) до тех пор, пока рассеяние происходит на турбулентных флуктуациях в инерционном интервале спектра. Это связано с тем, что при повышении частоты увеличивается доплеровский сдвиг и его проще различить на фоне помех. После перехода в интервал вязкости (с ростом высоты), который происходит раньше для меньших длин волн, интенсивность рассеяния резко падает. Чтобы увеличить потолок измерения скорости ветра, необходимо существенно улучшить характеристики радара и перейти на более низкие частоты [Hocking, 1997]. В заданных условиях радар HP-MST (158 МГц) позволит измерять скорости ветра до ~26 км со стандартным отклонением не более 1 м/с.

Потенциал при исследовании мезосферы

В мезосфере на высоте D-слоя ионосферы сигнал дополнительно усиливается за счет повышения электронной концентрации. В то же время с ростом высоты кинематическая вязкость атмосферы увеличивается, что приводит к затуханию турбулентностей малого размера в мезосфере и переходу в интервал вязкости и, следовательно, к ослаблению рассеянного сигнала [Hocking, 1985]. Тем не менее на высотах ~85 км в летнее время и ~70 км в зимнее время наблюдаются мезосферные летние (MSE, mesospheric

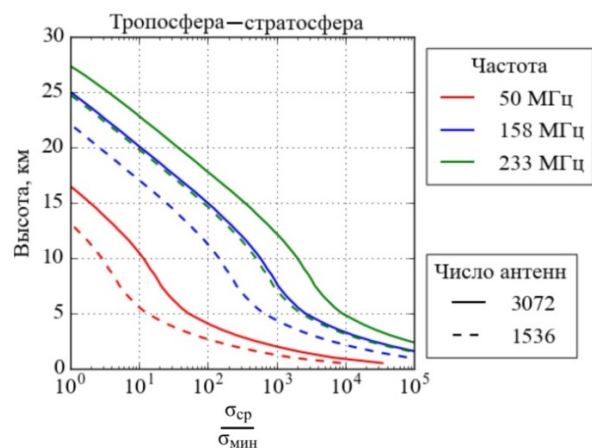


Рис. 3. Отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ в стратосфере для разных частот и размеров используемого антенного полотна

summer echo) и зимние (MWE, mesospheric winter echo) эхо-сигналы. Эхо регистрируется в широком диапазоне от средних до сверхвысокочастотных волн [Терещенко и др., 2002; Rapp et al., 2008]. Несмотря на то, что мезосферные эхо-сигналы в основном наблюдались в полярном регионе, регулярные наблюдения их проводились также и в средних широтах. В работе [Zeller et al., 2006] показано, что для среднеширотного радара частота появления эхо-сигналов составила 7 и 0.3 % от общего времени наблюдения для MSE и MWE соответственно. МСТ-радары позволяют также исследовать рассеяние на следах метеоритов на высотах 80–100 км, при этом можно определить температуру и скорость нейтрального ветра.

В интервале вязкости происходит затухание турбулентностей, однако существует механизм, который уменьшает ослабление рассеянного сигнала и, как полагают, приводит к появлению MSE [Lübken et al., 1998]. Летом на высотах ~85 км образуются ионизированные ледяные частицы, которые уменьшают диффузию электронов, что приводит к усилению флуктуаций электронной плотности на малых пространственных масштабах [Rapp, Lübken, 2004]. Степень ослабления диффузии характеризуется числом Шмидта Sc , которое может достигать нескольких тысяч единиц [Strelnikov et al., 2009]. Часто вместе с MSE на высотах ~82 км возникают серебристые облака [von Zahn, Bremer, 1999], видимые невооруженным глазом [Терещенко и др., 2010]. На высоте образования MWE (~70 км) кинематическая вязкость среды еще достаточно низкая и образование эха не требует наличия ледяных частиц. Считается, что MWE появляются, когда электронная концентрация и турбулентность среды повышены, что подтверждается комплексными измерениями атмосферных параметров [Lübken et al., 2007].

Использованная ранее формула для определения удельной ЭПР σ_{cp} [Lübken, 2014] позволяет варьировать число Шмидта Sc . Для моделирования MSE задан слой с повышенным значением Sc как необходимым условием появления эха. На рис. 4 показано отношение $\sigma_{cp}/\sigma_{мин}$ для трех частот и значений числа Шмидта. Стандартное отклонение оценки для мезосферы задано 2 м/с в связи с тем, что наблюдаемые скорости ветра в мезосфере выше, чем в тропосфере—стратосфере. При моделировании выбрано время суток с высокой электронной концентрацией в ионосфере, так как она влияет на мощность эхо-сигналов [Lübken, 2014]. Число Шмидта плавно возрастает от 1 на высоте 82 км до заданного значения на высоте 85 км. В отличие от тропосферы—стратосферы, в мезосфере затухание турбулентностей малых размеров становится значительным и радары с меньшими рабочими частотами обладают преимуществом независимо от оцениваемого параметра. Видно, что радар НР-МСТ позволит наблюдать MSE при повышенном значении Sc . Выше 87 км затухание становится значительным и уровень сигнала резко убывает.

Появление MWE не сопровождается увеличением Sc , однако, как правило, имеет место повышенная

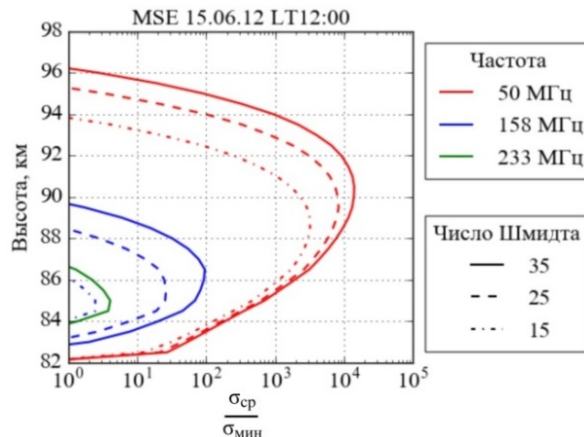


Рис. 4. Отношение $\sigma_{cp}/\sigma_{мин}$ при наблюдении летнего мезосферного эха для разных частот и чисел Шмидта

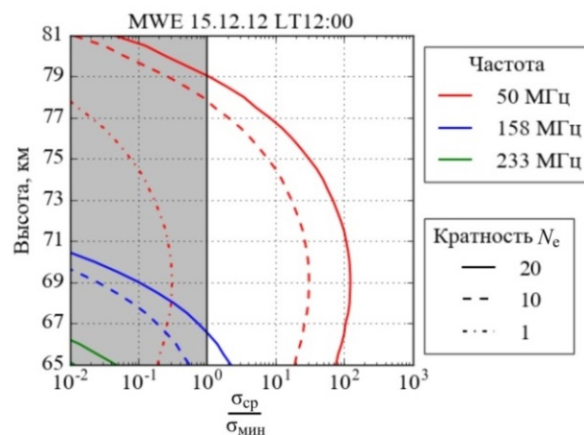


Рис. 5. Отношение $\sigma_{cp}/\sigma_{мин}$ при наблюдении зимнего мезосферного эха для разных частот и уровней электронной концентрации. Вертикальной линией отмечен порог чувствительности радара

электронная концентрация. На рис. 5 показано отношение $\sigma_{cp}/\sigma_{мин}$ при наблюдении MWE и кратном увеличении электронной концентрации относительно модельного значения IRI. Модель IRI не дает значения ниже 65 км, что отражено на рисунке. Черной вертикальной линией показана граница превышения сигналом чувствительности радара ($\sigma_{cp}/\sigma_{мин}=1$). Видно, что незначительное эхо на частоте 158 МГц возможно при повышении на порядок концентрации в D-слое ионосферы. Частота 233 МГц не позволяет измерить скорость нейтрального ветра в слое MWE в заданных условиях.

Некогерентное рассеяние

Метод НР является самым информативным средством анализа верхней атмосферы Земли. Он позволяет измерять параметры ионосферной плазмы: электронную концентрацию, температуру ионов и электронов, скорость дрейфа плазмы, ионный состав и частоту столкновения с нейтральной составляющей в D-слое.

Удельная эффективная площадь рассеяния для НР-измерений имеет вид

$$\sigma_{НР} = \frac{N_e \sigma_e}{(1 + \alpha^2)(1 + \alpha^2 + T_e/T_i)}, \quad (5)$$

где $\sigma_e \approx 10^{-28} \text{ м}^2$ — эффективная площадь рассеяния электрона, $\alpha = 4\pi D/\lambda$, D — радиус Дебая, T_e — тем-

пература электронов, T_i — температура ионов, N_e — электронная концентрация.

Параметры ионосферной плазмы оцениваются с помощью многопараметрической подгонки автокорреляционной функции или спектра принятого сигнала. Для анализа дисперсии оценок получаемых параметров удобно воспользоваться эмпирическим приближением, представленным в [Murdin, 1979] для электронной концентрации, температуры и скорости дрейфа плазмы. Параметры ионосферы значительно меняются с ростом высоты, что существенно влияет на спектр сигнала обратного рассеяния и характерные масштабы протекающих процессов (шкалу высот, длину приливных волн). Соответственно должен меняться режим работы радара при исследовании разных высот. Существуют два базовых режима для наблюдения ионосферы на высотах от 100 км: HP-1 и HP-2 (см. рис. 2). Первый режим предназначен для работы на высотах 100–600 км и характеризуется следующими параметрами: длительность излучения $\tau_{\text{и}}=700$ мкс, $PRF=250$ Гц. Кроме того, режим HP-1 предполагает использование только одного сегмента радара. В режиме HP-2 для высот от 600 км используются более протяженные импульсы $\tau_{\text{и}}=6500$ мкс, а частота их повторения снижается до $PRF=75$ Гц.

На рис. 6 показано отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ для режимов HP-1 и HP-2 при оценке электронной концентрации и температуры с относительным стандартным отклонением, не превышающим 10 %, и скорости дрейфа плазмы со стандартным отклонением не более 45 м/с. Длительность накопления выбрана равной 10 мин. Моделирование осуществлялось для летнего полудня, когда электронная концентрация достаточно высока. Видно, что оценить скорость дрейфа плазмы, даже с высоким статистическим отклонением, становится невозможно на меньшей высоте, чем концентрацию и температуру. На границе смены режима работы (600 км) длительность импульса повышается, но снижается частота повторения импульсов, поэтому отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ повышается незначительно. Выше 600 км отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ мало даже в предельном режиме работы, поэтому если реальный потенциал радара окажется меньше из-за неучтенных потерь в трактах или системе обработки, потолок определения параметров плазмы может опуститься до 800–1000 км. Тем не менее в возмущенных условиях возможно снижение времени накопления и, следовательно, улучшение временного разрешения, что позволит детально исследовать процессы в ионосфере.

Для сравнительной оценки потенциала на рис. 7 показано отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$, построенное по той же методике для ИРНР, который используется для исследования ионосферы более десяти лет [Жеребцов и др., 2002; Медведев, 2014]. ИРНР имеет частотный принцип сканирования и, по сравнению с радаром HP-MST, меньшую эффективную площадь антенны, принимает сигналы обратного рассеяния только в одной поляризации, излучает импульсы длиной не более 900 мкс с частотой повторения импульсов 24.4 Гц. Данные ограничения не позволяют эффективно изучать ионосферу на высотах более 600 км. Более того, окружающая помеховая обста-

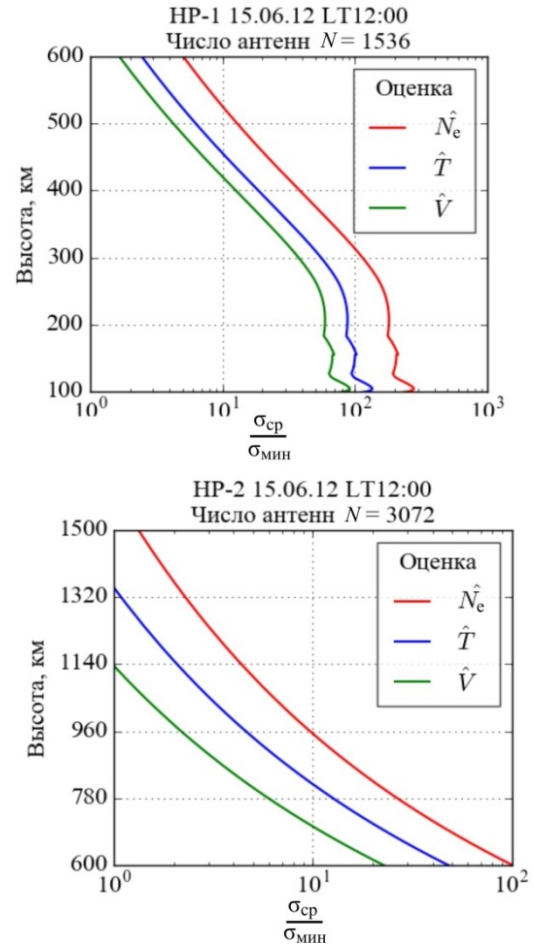


Рис. 6. Отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ при оценке электронной концентрации, температуры и скорости дрейфа плазмы. Число антенн режимов HP-1 и HP-2 определяет работу одним (1536 антенн) или двумя (3072 антенны) сегментами радара соответственно

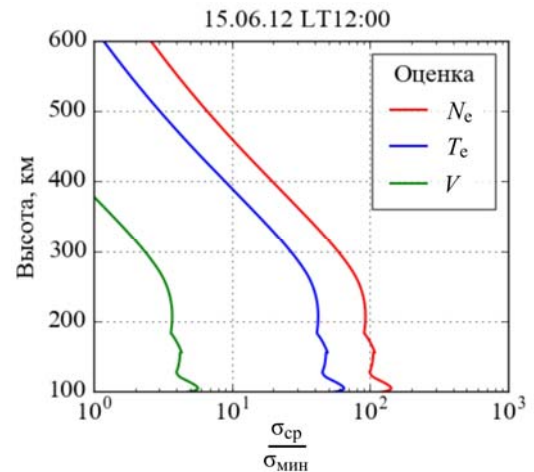


Рис. 7. Отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ для ИРНР

новка ограничивает нижний диапазон исследуемых высот, в результате чего невозможно наблюдение ионосферы и атмосферы на высотах до 100 км. Видно, что граница измерения скоростей находится намного ниже, чем показано на рис. 6, что обусловлено малой частотой повторения импульсов ИРНР и, соответственно, малой длиной выборки при одном и том же времени накопления (10 мин). При сравнении рис. 6 и 7 следует учитывать, что график на рис. 6 (режим

НР-1, верхняя панель) построен для одной решетки радара НР-МСТ, а при работе двумя решетками возможно изучение сразу двух направлений при тех же энергетических затратах. Однако надо отметить, что, в противоположность ИРНР, цифровая обработка сигналов в каждой антенне радара НР-МСТ повышает энергопотребление, что особенно заметно при работе в пассивном режиме.

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВ РАССЕЯННЫХ СИГНАЛОВ

В настоящее время наиболее перспективными при исследовании нижней, средней и верхней атмосферы являются интерференционные методы, получившие мощное развитие как в теоретическом плане, так и в плане постановки эксперимента. Создаются установки image radar, позволяющие восстанавливать по результатам радиолокационных измерений тонкую структуру неоднородностей в засвечиваемом объеме. Таким способом исследуются, например, турбулентность и скорость нейтрального ветра в нижней атмосфере. Построение радиолокационных изображений неоднородностей позволяет лучше понять физические механизмы, ответственные за их образование.

Основным объектом исследования в данном методе, связываемым с характеристиками среды, является нормированный коэффициент корреляции (КК) сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$, принятых на двух и более разнесенных антеннах:

$$\eta = \langle u_1 u_2^* \rangle / \sqrt{\langle |u_1|^2 \rangle \langle |u_2|^2 \rangle}. \quad (6)$$

В настоящее время интерференционный метод является наиболее перспективным при исследовании таких объектов, как космические аппараты (КА), космический мусор (КМ), метеоры, метеорные следы, сигналы обратного рассеяния от ионосферных неоднородностей, вытянутые вдоль магнитного поля турбулентные структуры, области искусственного нагрева, турбулентности в мезосфере и нижней атмосфере, внутренние гравитационные волны. Большой практический интерес представляет исследование космического радиоизлучения, особое внимание уделяется изучению распределения радиоизлучения по диску Солнца и его динамики.

Специфика антенной системы радара НР-МСТ позволяет рассматривать его как двухпозиционный интерферометр с базой $D=140$ м, в котором передающая и приемная антенны идентичны и обладают диаграммой направленности шириной по уровню половинной мощности 2.5° . Основной лепесток ДН антенны с точностью 5 % может быть аппроксимирован гауссианой:

$$F_{\text{beam}}(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_{\text{beam}}^2}\right), \quad (7)$$

где σ_{beam} — эффективная ширина луча.

Оценку чувствительности НР-МСТ-радара при наблюдениях ионосферных неоднородностей и ра-

диоастрономических объектов можно сделать следующим образом. Рассмотрим объект наблюдения гауссовой формы:

$$f(\theta) = \frac{\langle |\Delta n(\theta)|^2 \rangle}{W(\theta)} = A \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad (8)$$

где $\langle |\Delta n(\theta)|^2 \rangle$ — возмущение электронной концентрации ($\sigma_{\text{beam}}=0.711$), $W(\theta)$ — средний поток мощности ($\sigma_{\text{beam}}=1.422$), σ_0 — характерный угловой размер объекта, θ_0 — центр тяжести объекта. Несмотря на то, что исследуются разные объекты (возмущения электронной концентрации и распределенный радиоисточник), итоговое выражение для КК имеет вид

$$\eta = \exp\left(i\theta_0 \frac{k_a \sigma_{\text{beam}}^2}{\sigma_{\text{beam}}^2 + 2\sigma_0^2}\right) \underbrace{\exp\left(-\frac{k_a^2 \sigma_{\text{beam}}^2 \sigma_0^2}{2(\sigma_{\text{beam}}^2 + 2\sigma_0^2)}\right)}_{\text{Амплитуда КК}}, \quad (9)$$

где $k_a = 2\pi D/\lambda = 463.28$ (эл. град.)/(1 град. угла места), $\lambda = 1.9$ м — длина волны.

На рис. 8 показана зависимость амплитуды КК и эффективного наклона фазоугломестной характеристики КК $k_{\text{эф}}$ от углового размера наблюдаемого объекта σ_0 . Видно, что при увеличении угловых размеров объекта наклон фазоугломестной характеристики становится более пологим, т. е. интерферометр становится менее чувствительным к изменению углового положения наблюдаемого объекта.

Максимум производной амплитуды КК соответствует объекту с угловым размером 7.3 угл. мин, т. е. в данной области КК будет наиболее чувствителен к изменению угловых размеров объекта, что позволяет использовать КК для определения поперечных размеров наблюдаемого объекта. Высокая чувствительность НР-МСТ-радара к угловым размерам объекта порядка 7.5 угл. мин делает его перспективным инструментом для исследования тонкой структуры неоднородностей в нижней, средней и верхней атмосфере, а также тонкой структуры солнечного радиоизлучения.

Потенциальные возможности НР-МСТ-радара в режиме радиолокации КА и КМ

ЭПР КА можно выразить через основное уравнение радиолокации:

$$\sigma = \frac{S}{N} \frac{(4\pi)^3 R^4 k T \Delta B}{P G^2 \lambda^2}. \quad (10)$$

Поскольку наибольшую опасность представляет малоразмерный КМ, сделаем оценку чувствительности НР-МСТ-радара для объектов в рэлеевской области, т. е. при $k_0 a < 0.75$ (k_0 — волновое число, a — радиус металлической частицы). В области рэлеевского рассеяния для металлической частицы сферической формы соотношение между диаметром d частицы и ЭПР имеет следующую зависимость:

$$\sigma = 9 \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^4 \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2. \quad (11)$$

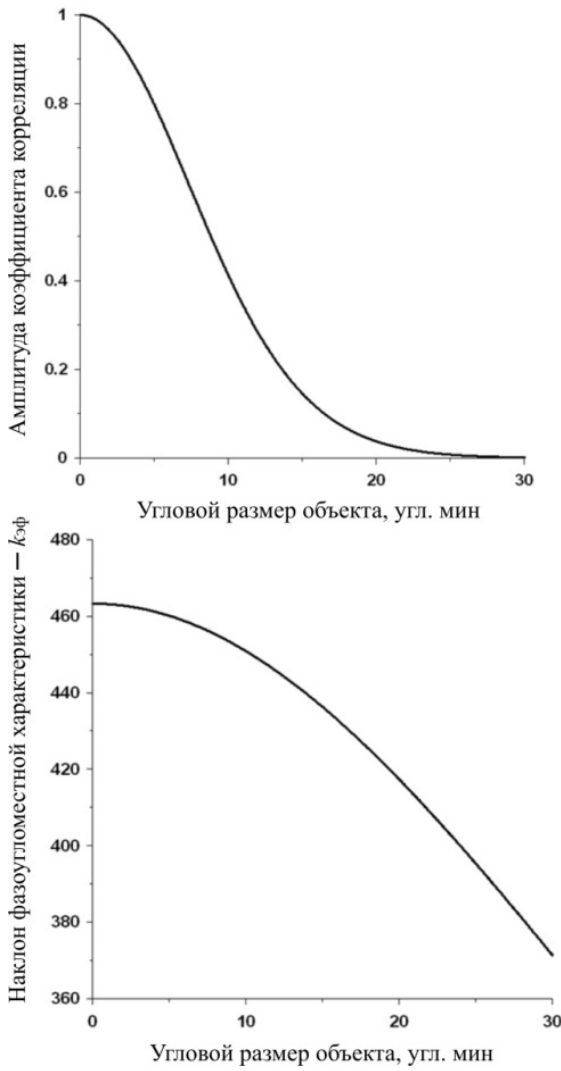


Рис. 8. Зависимость амплитуды КК (вверху) и наклона фазоугломестной характеристики от углового размера наблюдаемого объекта σ_0

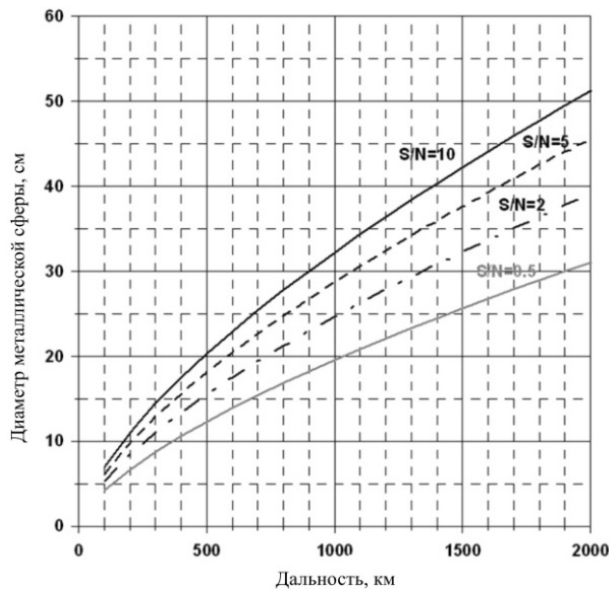


Рис. 9. Чувствительность НР-МСТ-радар в режиме радиолокации КА и КМ для разных отношений сигнал/шум

В табл. 2 приведены расчеты размеров частиц при $S/N=10$.

Таблица 2

Расчеты размеров частиц при $S/N=10$

R , км	100	400	1000	1500	2000
d , см	0.7	17.5	32.2	42.3	51.2

На рис. 9 приведена чувствительность НР-МСТ-радар в режиме радиолокации КА и КМ для разных отношений сигнал/шум. В ИСЗФ СО РАН отработаны методики и алгоритмы для ИРНР, позволяющие в режиме радиолокации устойчиво работать при $S/N < 1$. В настоящее время на ИРНР достигнута следующая точность определения координатной информации: среднеквадратичное отклонение по дальности ~100–300 м, среднеквадратичное отклонение определения углов цели ~2–5 угл. мин. Отработанные для ИРНР методики могут быть перенесены на НР-МСТ-радар, причем потенциальная точность определения углов может достигать 40 угл. сек.

Большой сектор сканирования НР-МСТ-радар, равный 90° , позволит наблюдать КА и КМ более 100 с, что достаточно для определения параметров орбиты с точностью, необходимой для прогноза на следующий виток движения объекта. Таким образом, данных НР-МСТ достаточно для определения параметров орбиты малоразмерного КМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радар НР-МСТ создается как инструмент для комплексной диагностики атмосферы от тропосферы до плазмосферы, поэтому необходимо, чтобы диапазон исследуемых высот был максимально протяженным. Методы радиозондирования атмосферы позволяют непрерывно исследовать турбулентности на высотах тропосферы, стратосферы и мезосферы, наблюдать метеоритное эхо на высотах мезосферы и нижней термосферы и изучать ионосферу на высотах от 60 км. Практически все виды радарного эха позволяют получить трехмерный вектор скорости для исследования динамики атмосферы и процессов переноса между атмосферными слоями.

В большинстве современных радаров для исследования атмосферы Земли используются фазированные антенные решетки. Этот вид антенной системы, в отличие от параболических антенн, позволяет изменять направление луча, не поворачивая антенну механически. Быстрое развитие цифровых систем дает возможность собирать сигналы с отдельных структурных элементов антенного полотна для дальнейшей обработки, в частности для интерферометрических наблюдений. Будущий радар НР-МСТ является также фазированной антенной системой с 24 приемными каналами, каждый из которых включает комплексные амплитуды сигналов обратного рассеяния двух поляризаций. Выбранное расположение антенных решеток дает широкий сектор обзора радар в северном и южном направлениях вдоль магнитного меридиана. Новая установка обладает характеристиками, сравнимыми с характеристиками современных НР- и МСТ-радаров.

Разнесение антенных решеток дает интерферометрическую базу 140 м, что позволит изучать тонкую структуру атмосферных неоднородностей. Показано, что антенная система даст возможность ис-

пользовать коэффициент корреляции для определения параметров орбиты космических аппаратов и космического мусора.

В работе проведена оценка диапазона рабочих высот радара НР-МСТ, отражающего общий потенциал радара при исследовании атмосферы. Показана возможность проведения регулярных измерений турбулентных неоднородностей в тропосфере и стратосфере. Обнаружено, что в нижней и средней атмосфере эффективность измерений скорости ветра выше для радаров с большей частотой, если рассеяние происходит в инерционном интервале спектра турбулентных флуктуаций показателя преломления. Нижняя граница рабочего диапазона высот в тропосфере будет определяться системой обработки сигналов, а именно фильтрацией местных радиопомех. Показано, что радар позволит наблюдать эхо-сигналы в летней мезосфере, рассеянные на турбулентных флуктуациях в присутствии заряженных ледяных частиц, что соответствует повышению числа Шмидта. Возможно также наблюдение более редких зимних мезосферных эхо-сигналов [Zeller et al., 2006] при повышенной электронной концентрации. На высотах мезосферы МСТ-радары с частотой 50 МГц [Hocking, 1997] будут иметь преимущество по сравнению с радаром НР-МСТ, поскольку турбулентности с характерными размерами, равными половине длины волны, начинают затухать с ростом высоты. Показано, радар НР-МСТ позволит измерять параметры плазмы: электронную концентрацию, температуру и скорость дрейфа плазмы — методом многопараметрической подгонки в режимах НР-1 и НР-2 (диапазоны высот 100–600 и 600–1500 км соответственно) с достаточной статистической точностью. Сравнительное моделирование потенциала радара ИРНР показало, что новая установка обладает большими диагностическими возможностями при изучении ионосферы на высотах от 400 км и позволит исследовать атмосферу ниже 100 км.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-6894. 2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1339–1345.

Жеребцов Г.А., Потехин А.П., Куркин В.И. и др. Радиофизические и оптические инструменты Национального геофизического комплекса РАН // Распространение радиоволн: XXIII Всеросс. науч. конф. Йошкар-Ола, 23–26 мая 2011 г.: сб. докл. в 3-х тт. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. Т. 1. С. 47–54.

Медведев А.В. Развитие методов и аппаратных средств радиофизических исследований верхней атмосферы Земли на Иркутском радаре некогерентного рассеяния: дис. ... д.ф.-м.н. Иркутск, 2014. 225 с.

Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В. и др. Цифровые системы регистрации и управления Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 11. С. 77–86.

Терещенко В.А., Терещенко В.Д., Черняков С.М. Зимние полярные стратосферные облака 2010 года в высоких широтах // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13, № 4/2. С. 1052–1059.

Терещенко В.Д., Терещенко В.А., Ковалевич Т.В. Сезонные изменения полярного мезосферного эха средних радиоволн // Труды 20-й Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород, 2–4 июля 2002 г. Нижний Новгород: НИРФИ, 2002. С. 135–136.

Bertin F., Campistron B., Caccia J.L., Wilson R. Mixing processes in a tropopause folding observed by a network of ST radar and lidar // Ann. Geophys. 2001. V. 19. P. 953–963.

Bowles K.L., Ochs G.R., Green J.L. On the absolute intensity of incoherent scatter echoes from the ionosphere // J. Res. National Bureau of Standards-D. Radio Propagation. 1962. V. 66D, N 4. P. 395–407.

Farley D.T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements // Radio Sci. 1972. V. 7, N 6. P. 661–666. DOI: 10.1029/RS007i006p00661.

Fukao S., Sato T., Tsuda T., et al. MU radar: New capabilities and system calibrations // Radio Sci. 1990. V. 25, N 4. P. 477–485. DOI: 10.1029/RS025i004p00477.

Gavrilov N.M. Estimates of turbulent diffusivities and energy dissipation rates from satellite measurements of spectra of stratospheric refractivity perturbations // Atm. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 12107–12116. DOI: 10.5194/acp-13-12107-2013.

Hagen J.B., Baumgartner H.A. Backscatter gain of aperture antennas // Radio Sci. 1996. V. 31, N 4. P. 693–699. DOI: 10.1029/96RS01095.

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.

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.

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

Kantha L., Hocking W. K. Dissipation rates of turbulence kinetic energy in the free atmosphere: MST radar and radiosondes // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. P. 1043–1051. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.11.024.

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.

Lübken F.-J. Turbulent scattering for radars: A summary // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. 2014. V. 107. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.015.

Lübken F.-J., Rapp M., Blix T., Thrane E. Microphysical and turbulent measurements of the Schmidt number in the vicinity of polar mesosphere summer echoes // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 6. P. 893–896.

Lübken F.-J., Singer W., Latteck R., Strelnikova I. Radar measurements of turbulence, electron densities, and absolute reflectivities during polar mesosphere winter echoes (PMWE) // Adv. Space Res. 2007. V. 40. P. 758–764. DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.015.

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.

Murdin J. Errors in incoherent scatter radar measurements // EISCAT Technical Note. 1979. N 79/16. 40 p.

Rapp M., Lübken F.-J. Polar mesosphere summer echoes (PMSE): Review of observations and current understanding // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4. P. 2601–2633. DOI: 10.5194/acp-4-2601-2004.

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. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 947–961. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.11.005.

Romejko V.A., Dalin P.A., Pertsev N.N. Forty years of noctilucent cloud observations near Moscow: Database and simple statistics // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D8. P. PMR 10-1–10-6. DOI: 10.1029/2002JD002364.

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

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.

Strelnikov B., Rapp M., Strelnikova I., et al. Small-scale structures in neutrals and charged aerosol particles as observed during the ECOMA/MASS rocket campaign // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1449–1456. DOI: 10.5194/angeo-27-1449-2009.

Strelnikova I., Rapp M. Studies of polar mesosphere summer echoes with the EISCAT VHF and UHF radars: Information contained in the spectral shape // *Adv. Space Res.* 2010. V. 45. P. 247–259. DOI: 10.1016/j.asr.2009.09.007.

Von Zahn U., Bremer J. Simultaneous and common-volume observations of noctilucent clouds and polar mesosphere summer echoes // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, N 11. P. 1521–1524.

Watkins B.J., Philbrick C.R., Balsley B.B. Turbulence energy dissipation rates and inner scale sizes from rocket and radar data // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93, N D6. P. 7009–7014.

Zeller O., Zecha M., Bremer J., et al. Mean characteristics of mesosphere winter echoes at mid- and high latitudes // *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 1087–1104. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.02.015.

Zmic D. Estimation of spectral moments for weather echoes // *IEEE Trans. Geoscience Electronics.* 1979. V. GE-17, N 4. P. 113–128. DOI: 10.1109/TGE.1979.294638.

REFERENCES

Bertin F., Campistron B., Caccia J.L., Wilson R. Mixing processes in a tropopause folding observed by a network of ST radar and lidar. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 953–963.

Bowles K.L., Ochs G.R., Green J.L. On the absolute intensity of incoherent scatter echoes from the ionosphere. *J. Res. of the National Bureau of Standards-D. Radio Propagation.* 1962, vol. 66D, no. 4, pp. 395–407.

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

Fukao S., Sato T., Tsuda T., et al. MU radar: New capabilities and system calibrations. *Radio Sci.* 1990, vol. 25, no. 4, pp. 477–485. DOI: 10.1029/RS025i004p00477.

Gavrilov N.M. Estimates of turbulent diffusivities and energy dissipation rates from satellite measurements of spectra of stratospheric refractivity perturbations. *Atm. Chem. Phys.* 2013, vol. 13, pp. 12107–12116. DOI: 10.5194/acp-13-12107-2013.

Hagen J.B., Baumgartner H.A. Backscatter gain of aperture antennas. *Radio Sci.* 1996, vol. 31, no. 4, pp. 693–699. DOI: 10.1029/96RS01095.

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.

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.

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

Kantha L., Hocking W. K. Dissipation rates of turbulence kinetic energy in the free atmosphere: MST radar and radiosondes. *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, pp. 1043–1051. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.11.024.

Latteck R., Singer W., Rapp M., et al. MAARSY: The new MST radar on Andøya — System description and first results. *Radio Sci.* 2012, vol. 47, RS1006. DOI: 10.1029/2011RS004775.

Lübken F.-J. Turbulent scattering for radars: A summary. *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 107, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.015.

Lübken F.-J., Rapp M., Blix T., Thrane E. Microphysical and turbulent measurements of the Schmidt number in the vicinity of polar mesosphere summer echoes. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, no. 6, pp. 893–896.

Lübken F.-J., Singer W., Latteck R., Strelnikova I. Radar measurements of turbulence, electron densities, and absolute reflectivities during polar mesosphere winter echoes (PMWE). *Adv. Space Res.* 2007, vol. 40, pp. 758–764. DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.015.

Medvedev A.V. Медведев А.В. *Razvitie metodov i apparatnykh sredstv radiofizicheskikh issledovaniy verkhnei atmosfery Zemlina Irkutskom radare nekogerentnogo rasseyaniya* [Development of methods and hardware of radio-physical investigations of Earth's upper atmosphere at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar]. Dr. Phys. and Math. Sci. Diss. Irkutsk, 2014. 225 p. (In Russian).

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. DOI: 10.1186/s40645-015-0051-8.

Murdin J. Errors in incoherent scatter radar measurements. *EISCAT Technical Note.* 1979, no. 79/16, 40 p.

Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Recording and control digital systems of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2008, iss. 11, pp. 77–86. (In Russian).

Rapp M., Lübken F.-J. Polar mesosphere summer echoes (PMSE): Review of observations and current understanding. *Atmos. Chem. Phys.* 2004, vol. 4, pp. 2601–2633. DOI: 10.5194/acp-4-2601-2004.

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. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, pp. 947–961. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.11.005.

Romejko V.A., Dalin P.A., Pertsev N.N. Forty years of noctilucent cloud observations near Moscow: Database and simple statistics. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. D8, pp. PMR 10-1–10-6. DOI: 10.1029/2002JD002364.

Sato K., Tsutsumi M., Sato T., et al. Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY). *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 118, pp. 2–15. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.08.022.

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.

Strelnikov B., Rapp M., Strelnikova I., et al. Small-scale structures in neutrals and charged aerosol particles as observed during the ECOMA/MASS rocket campaign. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 1449–1456. DOI: 10.5194/angeo-27-1449-2009.

Strelnikova I., Rapp M. Studies of polar mesosphere summer echoes with the EISCAT VHF and UHF radars: Information contained in the spectral shape. *Adv. Space Res.* 2010, vol. 45, pp. 247–259. DOI: 10.1016/j.asr.2009.09.007.

Tereshchenko V.A., Tereshchenko V.D., Chernyakov S.M. Winter polar stratospheric clouds at high latitudes in 2010. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Moscow State Technical University]. 2010, vol. 13, no. 4/2, pp. 1052–1059. (In Russian).

Tereshchenko V.D., Tereshchenko V.A., Kovalevich T.V. Seasonal variations of polar mesospheric echo of medium radio waves. *Proc. 20th National Conference on Radio Wave*

Propagation. Nizhny Novgorod, July 2–4, 2002. Nizhny Novgorod: NIRFI, 2002, pp. 135–136. (In Russian).

Von Zahn U., Bremer J. Simultaneous and common-volume observations of noctilucent clouds and polar mesosphere summer echoes. *Geophys. Res. Lett.* 1999, vol. 26, no. 11, pp. 1521–1524.

Watkins B.J., Philbrick C.R., Balsley B.B. Turbulence energy dissipation rates and inner scale sizes from rocket and radar data. *J. Geophys. Res.* 1988, vol. 93, no. D6, pp. 7009–7014.

Zeller O., Zecha M., Bremer J., et al. 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.

Zherebtsov G.A., Zavorin A.V., Medvedev A.V., et al. The Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Radiotekhnika i elektronika* [J. of Communications Technology and Electronics]. 2002, vol. 47, no. 11, pp. 1339–1345. (In Russian).

Zherebtsov G.A., Potekhin A.P., Kurkin V.I., et al. Radiophysical and optical instruments of the National Heliogeophysical Complex of RAS. *Radiowave Propagation. Proc. XXIII National Scientific Conference*. Yoshkar-Ola, May 23–26, 2011. *Yoshkar-Ola: MarGTU*, 2011, vol. 1, pp. 47–54. (In Russian).

Zrnic D. Estimation of spectral moments for weather echoes. *IEEE Trans. Geoscience Electronics*. 1979, vol. GE-17, no. 4, pp. 113–128. DOI: 10.1109/TGE.1979.294638.