

УДК 551.501.815.003.121

Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов

В. Ю. Жуков*, Г. Г. Щукин*

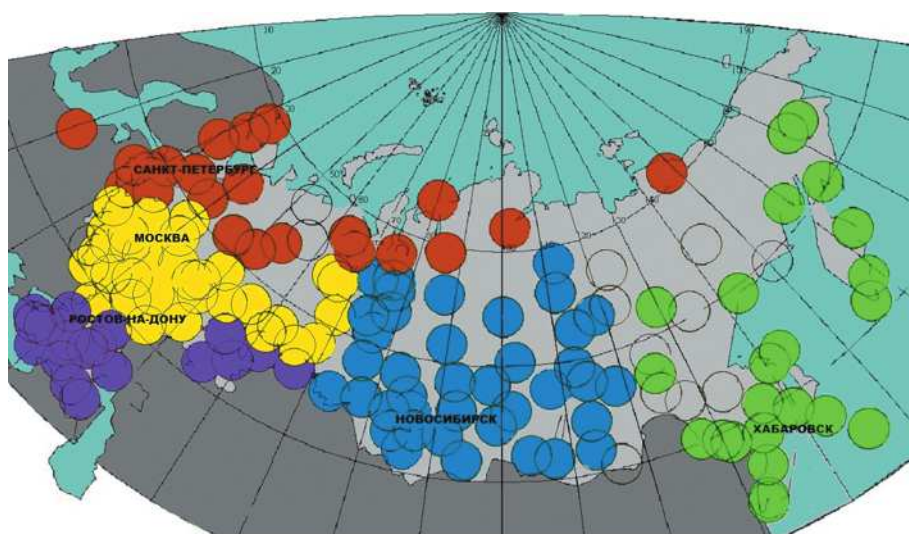
Обсуждаются проблемы, возникающие при создании на территории России новой сети доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С. Сравниваются возможности этих радиолокаторов с теми, что составляли прежнюю сеть. Кратко описываются измеряемые ими характеристики принимаемого сигнала и алгоритмы их оценивания. Делается вывод о неполном соответствии применяемых программ вторичной обработки информации тому потенциалу, которым обладает ДМРЛ-С. Предлагается форсировать разработку методических документов, регламентирующих работу новой сети, и создание на их основе дополнений к программе вторичной обработки информации. Рассматривается возможность дополнения создаваемой сети малогабаритными метеорологическими радарными, устанавливаемыми в местах, где наиболее вероятно появление таких опасных явлений, как смерчи или сильные ливни.

С 2011 г. идет модернизация сети штормоповещения Росгидромета. Существующая сеть, состоящая из метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 (31 шт.) и МРЛ-2 (4 шт.), должна быть заменена на 140 новых метеорологических радаров ДМРЛ-С (рисунок), объединяемых единым федеральным центром в Москве.

Как показывает опыт проведения работ по модернизации и автоматизации радиолокаторов МРЛ-5, их технический ресурс еще не исчерпан. Замена некоторых узлов на более современные, установка систем автоматизации (“Метеоячейка”, АКСОПРИ, “Мерком”, АСУ-МРЛ), объединение в единую сеть позволили бы продлить срок их применения еще, как минимум, на десять лет.

Проблема состоит в моральном устаревании аппаратуры. За время, прошедшее с момента запуска метеорологического радиолокатора МРЛ-5 в серию (1976 г.), радиометеорология продвинулась далеко вперед. Современные изделия большинства фирм, работающих в рассматриваемой области, измеряют шесть параметров сигнала, отражаемого метеопреобразованиями, в то время как МРЛ-5 продолжает оценивать только радиолокационную отражаемость. Благодаря усилиям разработчиков и специалистов, занимавшихся методиками наблюдений, этого достаточно, чтобы с высокой степенью вероятности прогнозировать развитие таких опасных явлений, как град, гроза и сильный ливень. Но внедрение методов спектральной и поляризационной обработки, во-первых, добавляет к уже упомянутым области сдвига ветра, повышенной турбулентности, переохлажденной воды,

* Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского; e-mail: vuzhukov2002@list.ru, ggshchukin@mail.ru.



Планируемое размещение ДМРЛ-С на территории Российской Федерации.

Диаметр кружка вокруг точки расположения — зона действия радара в режиме измерения отражаемости.

скопления птиц и насекомых и т. д. и, во-вторых, значительно увеличивает точность измерения интенсивности осадков.

Измерять спектральные характеристики принимаемого сигнала пытались и в некогерентных метеорологических радиолокаторах (МРЛ). В Главной геофизической обсерватории (ГГО) изучали возможность оценивания ширины спектра принимаемого сигнала с помощью связи автокорреляционных функций (связанных со спектрами обратным преобразованием Фурье) исходного сигнала и той, что получается на выходе линейного или квадратичного детектора. В Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) измеряли разность средних частот спектра сигналов, отраженных от разных участков пространства, разнесенных по координате дальности на 0,5—1 км. Делалось это путем подачи принимаемого в данный момент и задержанного на время, соответствующее указанным расстояниям, сигналов на входы фазового детектора, для чего был разработан специальный прибор “УИТ” (устройство измерения турбулентности) [6]. Однако по мере продвижения в данной области становилось ясно преимущество когерентной радиолокации, чему во многом способствовали труды таких известных исследователей, как В. В. Костарев, А. Г. Горелик и др. [4, 8].

Еще большие возможности в плане увеличения информативности МРЛ открывает введение режима двойной поляризации. Исследования по измерению поляризационных характеристик сигнала вели еще в 1960-х годах. Известны, например, работы А. Б. Шупяцкого (ЦАО) [10] и сотрудников Военно-воздушной академии им. А. Ф. Можайского под руководством Ю. А. Мельника [7]. Но наиболее важные результаты были получены в Национальной лаборатории сильных штормов (США) в работах Д. Зрнича, А. В. Рыжкова [13] и др. В итоге было доказано, что, во-первых, опти-

мальным для МРЛ является линейный поляризационный базис, и, во-вторых, с точки зрения метеорологической интерпретации интерес представляет измерение трех поляризационных характеристик: дифференциальной отражаемости, дифференциальной фазы и модуля коэффициента взаимной корреляции вертикальной и горизонтальной составляющих сигнала.

Перспективным, но не используемым до сих пор направлением является совмещение активной и пассивной радиолокации путем встраивания СВЧ-радиометра в приемный канал МРЛ. Синхронная работа радиометра с МРЛ позволяет оценивать водозапас облаков и тем самым надежно прогнозировать их развитие [11]. Данная опция прописана в техническом задании на ДМРЛ-С как дополнительная и, возможно, в скором времени будет воплощена в жизнь.

Современный отечественный метеорадар ДМРЛ-С способен измерять все шесть рассмотренных выше характеристик [1] и позволяет вывести российскую радиометеорологию на передовые позиции. Кроме этого, ДМРЛ-С имеет одно значительное преимущество по сравнению с возможными конкурентами — большую эффективную мощность излучения, что достигнуто с помощью технологии сжатия широкополосного сложного сигнала. До этого применение данной технологии в метеорологической радиолокации осложнялось тем, что при сжатии сигнала в фильтре приемника образовывались слишком большие боковые лепестки, располагавшиеся непосредственно перед главным лепестком и после него. Изобретенный специалистами разработчика ОАО «НПО «Лианозовский электро-механический завод» нелинейный частотно модулированный импульс позволил преодолеть данное препятствие с помощью уменьшения относительного уровня указанных лепестков ниже -50 дБ — величины, считающейся критической для метеорологической радиолокации. В итоге реальная мощность излучения составляет всего 15 кВт, что дает возможность отказаться от наддува волноводного тракта и уменьшить значения больших напряжений, необходимых для работы генераторов, увеличив тем самым их время наработки на отказ. Длительность излучаемого импульса составляет 60 мкс, но сжатие его при приеме в 60 раз приводит к результирующей длительности 1 мкс и, соответственно, эффективной мощности излучения 900 кВт. Недостатком такого построения радиолокатора является то, что образуется «мертвая» зона радиусом 9 км, соответствующая времени излучения длительного импульса (60 мкс), в течение которого антенна переключена на излучение и закрыта на прием. Преодолевается он излучением перед генерацией основного сигнала импульса подсветки длительностью 1 мкс и мощностью 15 кВт. Это практически не влияет на режим работы ДМРЛ-С, так как занимает чуть более 60 мкс времени. Разделение «простого» и «сложного» сигналов происходит в приемнике с помощью фильтров, настроенных на каждый из данных сигналов.

Таким образом, Россия получила уникальный передовой радиолокатор для создания сети штормоповещения, соответствующей жестким современным требованиям. Рассмотрим более подробно принципы его работы.

Основное, на взгляд авторов, отличие МРЛ от классических приборов, применяемых в метеорологии, заключается в том, что осреднение измеряемого параметра происходит не по времени в какой-то точке простран-

ства, а по объему пространства в определенный момент времени. Данный объем называется в радиолокации разрешаемым объемом и определяется шириной диаграммы направленности антенны радиолокатора и длительностью импульса на выходе приемного фильтра (длительностью зондирующего сигнала в случае применения “простого” импульса). При нахождении внутри элемента разрешения частиц воды или льда происходит рассеяние на них электромагнитной волны во всех направлениях, в том числе и обратно к МРЛ. Измеряя мощность отраженного сигнала, рассчитывают радиолокационную отражаемость наблюдаемого участка цели.

По величине радиолокационной отражаемости оценивают такую важную для метеорологических наблюдений величину, как интенсивность осадков. Для этого часто используют формулу Маршалла — Пальмера, основанную на предположении о распределении диаметров частиц по одноименному закону и связывающую радиолокационную отражаемость и интенсивность осадков [9]. Поскольку реальное распределение капель по размерам может существенно отличаться от предполагаемого, а также из-за неполного заполнения разрешаемого объема частицами или его частичного блокирования местными предметами (местниками) расчет интенсивности осадков может приводить к большим ошибкам, достигающим 300% [2]. Для повышения точности применяют коррекцию на ослабление в осадках, т. е. пытаются восстановить реальную отражаемость посредством учета затухания электромагнитной волны на трассе ее распространения до рассматриваемого участка, но радикального улучшения ситуации не происходит.

По характерным особенностям пространственного распределения радиолокационной отражаемости идентифицируют наблюдаемые метеорологические цели. Так, отражения, находящиеся ниже уровня 1 км, однозначно трактуются как осадки, а протяженная однородная цель на высоте выше 1 км — как слоистая облачность. Кучевую облачность определяют по характерным вертикально ориентированным областям отражаемости. Грозы и градоопасные облака определяют по величине отражаемости на определенных уровнях над поверхностью земли и высоте верхней границы радиозона [9].

На этом практически исчерпываются возможности некогерентных радаров. Упомянувшиеся выше попытки анализировать спектр сигнала на выходе амплитудного детектора или измерять посредством фазового детектора разницу средних частот отражений от различных участков метеорологической цели не привели к какому-либо значительному увеличению информативности радиолокационных наблюдений. Введение когерентного режима дает возможность существенно расширить список опасных явлений, обнаруживаемых радиолокатором, добавив к нему следующие: зоны сильного ветра; торнадо (смерчи); фронты порывистости; области сдвига ветра; зоны повышенной турбулентности и микрошквалы.

К сожалению, в ДМРЛ-С на карте явлений погоды перечень последних оставлен таким же, как и для некогерентных МРЛ. Правда, в числе его выходных продуктов есть карты турбулентности и сдвига ветра, но как самостоятельные опасные явления они не выделяются. То же относится к поляризационным измерениям, которые будут рассмотрены ниже.

Смысл спектральной обработки в когерентном МРЛ состоит в том, что фиксируется изменение фазы принимаемого сигнала, возникающее вследствие движения наблюдаемой цели. Если в какой-то момент времени поступает сигнал от одиночной цели

$$s(t) = A \sin \left(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \frac{2R}{c} \right), \quad (1)$$

(A — амплитуда сигнала; f_0 — несущая частота; φ_0 — начальная фаза излученного колебания; R — расстояние до цели; c — скорость света), то в следующий период повторения зондирующего сигнала получим

$$s(t + T_n) = A \sin \left(2\pi f_0 (t + T_n) + \varphi_0 + \frac{2(R + V_R T_n)}{c} \right), \quad (2)$$

где R — расстояние, пройденное целью, обладающей радиальной скоростью V_R , за время T_n вдоль антенного луча, определяемое выражением

$$R = V_R T_n. \quad (3)$$

Разность фаз этих двух сигналов составляет

$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_0 + \frac{2}{c} (R + V_R T_n - R) = \frac{2V_R}{c} T_n. \quad (4)$$

С помощью фазового детектирования данное происходящее от периода к периоду изменение фазы может быть преобразовано в амплитудные колебания с частотой

$$f_d = \frac{2V_R}{c}, \quad (5)$$

называемой доплеровской, по которой легко рассчитывается радиальная скорость цели. Единственная сложность — требуется знать начальные фазы колебаний в каждый период излучения зондирующего импульса. Именно это отличает когерентный МРЛ от некогерентного и дает возможность измерить величину радиальной скорости одиночной цели. Поскольку метеообразование состоит из огромного числа элементарных целей, то на выходе приемника получаем случайный процесс, спектр которого содержит информацию о распределении радиальной скорости частиц внутри разрешаемого объема. Рассчитав первый и второй центральный моменты этого спектра, получаем оценки среднего значения данных скоростей и их разброса относительно среднего значения.

Таким образом, зоны сильного ветра и фронты порывистости проявляются на карте радиальной скорости в виде областей больших значений параметра, а зоны интенсивной турбулентности и сильного сдвига ветра — в виде таких же областей на карте ширины спектра. Сдвиг ветра с высотой, кроме того, может быть вычислен по результатам измерения средней радиальной скорости частиц в каждом из выбранных горизонтальных слоев пространства [5].

Торнадо могут быть идентифицированы по резкому скачку средней радиальной скорости, имеющему место в случае, когда поперечные размеры торнадо превосходят размер элемента разрешения радиолокатора. В противном случае идентификация возможна только по локальному расширению спектра принимаемого сигнала.

Микрошквал, резкое нисходящее движение небольшого объема воздуха — наиболее трудно обнаруживаемое явление из приведенного списка. В отличие от остальных его непосредственное обнаружение невозможно, так как влияние вертикальной составляющей скорости частиц на величину радиальной скорости становится существенным только при больших углах возвышения антенны, а значит — на очень небольшом расстоянии от метеорадаара. Поэтому в основу поиска данного явления положено измерение дивергенции средних радиальных скоростей в смежных по дальности элементах разрешения, расположенных в приземном слое. Для этого при близком к нулевому значению угле возвышения антенны вычисляют разность оценок средней скорости в объемах, расположенных перед и после исследуемой дальности.

Поляризационные эффекты в метеорологической радиолокации основаны в основном на свойстве капель воды сплющиваться и сохранять ориентацию при падении в атмосфере. Поляриметрический радар излучает одновременно или последовательно электромагнитные волны с горизонтальным и вертикальным расположением вектора напряженности электрического поля. Из-за разности размера капли мощность горизонтально ориентированной волны при отражении получается больше, чем ориентированной вертикально. Выделяя при приеме каждую из волн и соответствующим образом обрабатывая, получают следующие поляризационные характеристики [3]: дифференциальную отражаемость; дифференциальную фазу; модуль коэффициента взаимной корреляции.

Дифференциальная отражаемость — это отношение мощностей горизонтально и вертикально поляризованных волн, определяемое следующим выражением:

$$Z_{DR} = \frac{P_h}{P_v} \frac{\langle |H|^2 \rangle}{\langle |V|^2 \rangle}, \quad (6)$$

где Z_{DR} — дифференциальная отражаемость; P_h и P_v — мощности горизонтальной и вертикальной составляющих сигнала соответственно; H и V — комплексные сигналы на выходе приемников, угловые скобки означают осреднение по времени. Ввиду того, что отношение осей эллипса, в который при падении капли превращается ее сечение в вертикальной плоскости, зависит от ее размера, по значению рассматриваемого параметра можно судить о величине наблюдаемых частиц. Но наиболее эффективна дифференциальная отражаемость при определении агрегатного состояния последних. В отличие от капель воды ледяные частицы либо имеют сферическую форму (град), либо хаотично ориентированы в пространстве (снежная крупа, снежинки, ледяные иглы). Это приводит к тому, что отраженный ими сигнал имеет близкую к нулю дифференциальную отражаемость.

Совместное использование оценок радиолокационной и дифференциальной отражаемости позволяет легко идентифицировать следующие цели:

- сухой град, снег, которым соответствуют малое значение отражаемости Z и близкое к нулю значение дифференциальной отражаемости Z_{DR} ;
- слабый или средний дождь — средние значения обоих параметров;
- сильный дождь, ливень — большие значения обоих параметров;
- скопления насекомых — очень большие значения Z_{DR} ;
- местники — отрицательные значения Z_{DR} .

Дифференциальная фаза определяется как разность фаз волн, принимаемых по горизонтальному и вертикальному каналам приемника. В отличие от остальных измеряемых метеорадарами параметров она есть результат не отражения электромагнитной волны от цели, а ее распространения по трассе от радиолокатора до цели и обратно. Из-за сплющивания падающих капель условия распространения горизонтально и вертикально поляризованных волн различны, а как результат этого — различен набег фаз каждой из них. Значение рассматриваемой разности зависит от величины капель и их концентрации. Аналогично дифференциальной отражаемости ее значение близко к нулю при распространении в ледяных частицах и больше нуля для жидких частиц.

Главная область применения дифференциальной фазы — измерение интенсивности осадков, погрешность которой при этом значительно уменьшается. Алгоритм оценивания следующий [12]:

1) по оценкам дифференциальной фазы $_{DR}$ определяют величину интегрального ослабления на участке, занятом осадками,

$$PIA(r_1, r_2) = [_{DR}(r_1) - _{DR}(r_2)], \quad (7)$$

где величина постоянной $_{DR}$ определяется частотой несущего колебания и может корректироваться в процессе измерений по получаемым оценкам дифференциальной отражаемости Z_{DR} на участке луча от r_1 до r_2 — начальной и конечной дальности участка с наблюдаемыми осадками;

2) по профилю радиолокационной отражаемости рассчитывают затухание волны на трассе между радаром и участком цели, удаленном на расстояние r , по формуле

$$A(r) = \frac{[Z(r)]^b C(b, PIA)}{J(r_1, r_2) C(b, PIA) J(r, r_2)}, \quad (8)$$

где

$$J(r_1, r_2) = 0,46b \int_{r_1}^{r_2} [Z(x)]^b dx; \quad (9)$$

$$J(r, r_2) = 0,46b \int_r^{r_2} [Z(x)]^b dx; \quad (10)$$

$$C(b, PIA) = \exp(0,23bPIA) - 1; \quad (11)$$

b — постоянный коэффициент, значения которого лежат в пределах 0,6—0,9 и зависят от длины волны радиолокатора.

Модуль коэффициента взаимной корреляции оценивается в соответствии с выражением

$$r_{hv} = \text{mod}(r_{hv}), \quad (12)$$

где

$$r_{hv} = \langle H^* V \rangle / (P_h P_v)^{1/2}. \quad (13)$$

Главное назначение данного параметра — служить идентификатором метеорологических целей. Его значения для них находятся в пределах 0,95—1,0, во всех остальных случаях он, как правило, меньше 0,5.

Для надежного распознавания опасных явлений кроме добротного сделанного радиолокатора и сети передачи информации, которую еще пред-

стоит организовать, очень важно расположение точек наблюдения по контролируемому пространству. Как было сказано выше, планируется создать сеть из 140 радаров. Для мониторинга всей территории России этого недостаточно. При радиусе действия ДМРЛ, равном 250 км, больше половины площади остается не охваченной сетью. Мало того, для некоторых опасных явлений ситуация еще хуже: например, смерчи обнаруживаются только в когерентном режиме работы радара, дальность действия при котором сокращается до 125 км.

Но и при идентификации явлений в некогерентном режиме, при котором дальность действия радара равна 250 км, тоже возникают проблемы. Дело в том, что на таком расстоянии сказывается кривизна земной поверхности, из-за чего на максимальной дальности могут наблюдаться только объекты, расположенные на высоте более 4 км. Значит, осадки (в том числе сильные ливни) становятся “невидимыми”. Очевидно, что уплотнение сети нереально по экономическим соображениям. Поэтому более перспективным представляется дополнение сети ДМРЛ-С малогабаритными МРЛ, устанавливаемыми в местах возможного появления смерчей и (или) сильных ливней.

Кроме того, существуют ситуации, в которых использование малогабаритных МРЛ оправдывается по всем параметрам. Так, в горной местности от МРЛ не требуется большой дальности действия. Гораздо важнее (как показывает опыт г. Крымск) расположить его рядом с защищаемыми объектами для более точного измерения и прогнозирования интенсивности и количества осадков.

Изготовлением малогабаритных МРЛ занимается сейчас большинство работающих в этой области фирм. В России они представлены, как минимум, двумя образцами: “Контур МЕТЕО-01” (изготовитель ООО “Контур-НИИРС”); МРМЛ (ОАО “НПО Завод “Энергия”).

Таким образом, насущными проблемами вновь создающейся сети штормоповещения, на взгляд авторов, являются следующие.

1. Методическое сопровождение. Наиболее полное использование всех возможностей, которые заложены в радиолокаторе ДМРЛ-С, требует создания новых методик идентификации и прогнозирования опасных явлений и написания руководящих документов для производства наблюдений.

2. На основании новых методик доработка программ вторичной обработки информации с целью расширения списка обнаруживаемых опасных явлений погоды.

3. Решение вопроса о более полном охвате территории страны зонами контроля МРЛ. Вариант такого решения — дополнение сети ДМРЛ-С малогабаритными метеорологическими радиолокаторами, устанавливаемыми либо между ними в районах, где высока вероятность формирования таких опасных явлений, как смерч и сильные ливни, либо там, где использование больших МРЛ неэффективно.

Литература

1. Абшаев М. Т., Вовшин Б. М., Вылегжанин И. С. и др. Доплеровский метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для исследования облаков и осадков. /В сб.: Сборник докладов 23-й Всероссийской научной конференции “Распространение радиоволн”. — Йошкар-Ола, 2011, т. 1, с. 107—110.
2. Боровиков А. М., Костарев В. В., Мазин И. П. и др. Радиолокационные измерения осадков. — Л., Гидрометеиздат, 1967, 140 с.
3. Вовшин Б. М., Вылегжанин И. С., Жуков В. Ю. и др. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации. /В сб.: Труды V Всероссийской научной конференции “Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред”. — Муром, 2012, с. 49—54.
4. Горелик А. Г. Пути развития зарубежной и отечественной доплеровской радиолокации. — М., Московская государственная академия приборостроения и информатики, 1995, 21 с.
5. Готюр И. А., Жуков В. Ю., Кулешов Ю. В. и др. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты. — Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21, с. 66—75.
6. Иванов А. А., Колосков Б. П., Мельничук Ю. В., Черников А. А. Радиолокационный метод исследования пространственной структуры турбулентности в облаках и осадках. /В сб.: Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Под ред. А. А. Черникова. — М., Гидрометеиздат, 1978, с. 37—40.
7. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. — М., Советское радио, 1966, 440 с.
8. Мельничук Ю. В. Измерение турбулентности в осадках с помощью доплеровской радиолокационной станции. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1966, № 7, с. 694—704.
9. Руководящий документ РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. — СПб, Гидрометеиздат, 1993, 357 с.
10. Шупяцкий А. В., Моргунов С. П. Применение эллиптически поляризованных радиоволн для исследования облаков и осадков. — Доклады АН СССР, 1961, т. 140, № 3, с. 591—594.
11. Щукин Г. Г., Булкин В. В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. — Муром, 2009, 166 с.
12. Ryzhkov A., Diederich M., Zhang P., and Simmer C. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. — J. Atmos. and Oceanic Technol., 2013 (in press).
13. Zrnic D. S. and Ryzhkov A. V. Polarimetry for weather surveillance radars. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1999, vol. 80, No. 3, pp. 389—406.

Поступила
27 VIII 2013