

*И.А. Готюр, А.М. Девяткин, В.Ю. Жуков, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин*

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДОППЛЕРОВСКИХ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С ДВОЙНОЙ  
ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

*I.A. Gotyur, A.M. Deviatkin, V.Y. Zhukov, U.V. Kuleshov, G.G. Shchukin*

**THE INFORMATIONAL CAPABILITIES OF DOPPLER WEATHER RADAR  
WITH DUAL POLARIZATION**

*Рассматриваются этапы развития метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией и особенности их работы. Приводятся примеры расширения области их применения относительно некогерентных метеорадаров. Намечаются возможные пути развития метеорологической радиолокации.*

*Ключевые слова: радарная метеорология, доплеровский радиолокатор, радиополяриметрия, СВЧ радиометрия.*

*We consider the stages of the development of meteorological radars with dual polarization and features of their work. Provides examples of the expansion of the area of their application regarding incoherent meteorological radar. Outlines possible ways of development of the meteorological radar.*

*Key words: radar meteorology, Doppler radar, radio polarimetry, microwave radiometry.*

Годом рождения метеорологической радиолокации считается 1941, когда английские исследователи впервые наблюдали на индикаторе радара засветки от ливневых осадков. С того момента минуло не так уж много времени, за которое она прошла большой путь от первых некогерентных до современных многопараметрических метеорадаров, без которых невозможна работа ни одного большого аэропорта. Первым большим шагом в развитии было осознание специфики метеорологических радиолокационных наблюдений, к которым в первую очередь относится необходимость измерения мощности принимаемого сигнала в большом динамическом диапазоне порядка 100 дБ. Сюда же следует отнести иную, нежели в классической радиолокации точечных целей, зависимость мощности отражений от дальности (обратно пропорционально квадрату расстояния, а не его четвертой степени) и ее зависимость от длительности зондирующего импульса [16]. Все это потребовало создания специальной техники — метеорологических радиолокаторов. Хотя поставляемая ими информация была по современным меркам достаточно примитивна (только распределение по окружающему пространству мощности эхо-сигналов), наработанный большой опыт и глубокая методическая проработка проведения наблюдений позволили разработать алгоритмы обнаружения метеоявлений и измерения их характеристик, которые успешно и широко применяются до сих пор в самых новых технических разработках.

Следующие шаги в своем развитии радиометеорология делала, «идя в фарватере» классической радиолокации. В первую очередь это связано с привлечением методик спектрального анализа принимаемых сигналов. Однако к необходимости вводить когерентный режим в метеорологические РЛС пришли не сразу. До этого пытались найти методы измерения характеристик спектра в некогерентных лоаторах. Например, оценивание ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора приемника. Как известно [12], корреляционная функция случайного процесса ( $R_E$ ), получаемого после детектирования, функционально связана с корреляционной функцией исходного нормального процесса ( $R_0$ ). Для квадратичного детектора она имеет вид:

$$R_E(\tau) = R_0^2(\tau), \quad (1)$$

для линейного детектора она более сложная:

$$R_E = \frac{\pi}{4(4-\pi)} \left[ R_0^2(\tau) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{[(2n-3)!!]^2}{2^{2n-1}(n!)^2} R_0^{2n}(\tau) \right]. \quad (2)$$

В предположении о Гауссовой форме спектра отражений от метеообразований возможно применение для указанных целей метода парных импульсов, не требующего большого числа вычислений. Это позволило измерять спектральные характеристики сигнала даже при существующем в то время (80-е гг. прошлого века) уровне развития вычислительной техники. Как следует из приведенных формул, спектр сигнала, прошедшего через амплитудный детектор, остается Гауссовым и его ширина определяется в этом случае по формуле:

$$\hat{\sigma}_E = \frac{v_a}{\pi} \left[ -\ln |\hat{R}_E(T)|^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $v_a$  — граница интервала однозначного измерения скорости (интервала Найквиста);  $T$  — период повторения зондирующих импульсов; треугольный значок над символом означает оценку данного параметра.

Предполагалось, что на развертке конического разреза луча, т.е. на карте распределения параметра, получаемой при полном обороте антенны под выбранным постоянным углом места, слой повышенной турбулентности будет просматриваться в виде кольца его больших значений. Проведенные эксперименты показали, что данные предположения верны лишь в половине наблюдавшихся случаев. В остальных же случаях эти зоны имели вид двух полуколец. Пример такого пространственного распределения приведен на рис. 1. Дать объяснение наблюдаемому эффекту без привлечения информации о распределении в пространстве радиальных скоростей частиц, т.е. без применения когерентного радара, было невозможно.

Другой метод был реализован в устройстве измерения турбулентности (УИТ), созданном Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО) и Горьковским конструкторским бюро завода «Электромаш» и предназначенном для встраивания в

радиолокатор МРЛ-5 [9]. Прибор позволял оценивать разность средних радиальных скоростей частиц, расположенных в разнесенных на 0,5 км по дальности импульсных объемах. По превышению данным параметром определенного порога принималось решение о появлении в зоне обзора вертикальных движений воздуха. Особенно большие надежды возлагались на него при обеспечении активных воздействий на облака. Однако развитие техники продолжилось по другому пути.

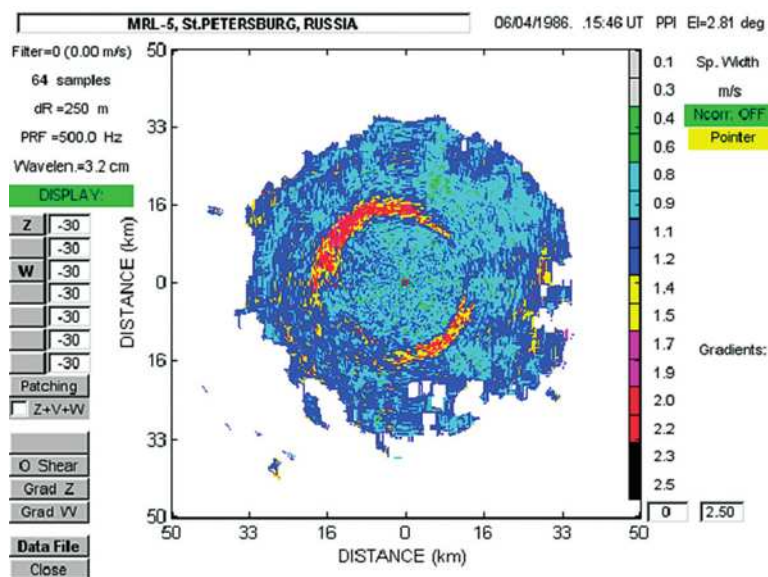


Рис. 1. Карта распределения ширины спектра сигнала по поверхности конического разреза, полученного при угле места антенны 2,81 градуса 06 апреля 1986 года в п. Воейково Ленинградской области.

Колебаниям в вопросе введения когерентного режима в метеорологические радиолокаторы был положен конец, когда в конце 80-х гг. XX в. США развернули на своей территории сеть NEXRAD из более сотни доплеровских радаров WSR-88D. С тех пор все вновь разрабатываемые метеорадары становятся доплеровскими, за малым исключением, например, бортовых авиационных радиолокаторов, в которых малый вес и габариты ценятся больше, чем наличие когерентности.

Накопленный к этому времени опыт теоретических и экспериментальных исследований был обобщен в фундаментальном труде известных американских ученых Д.И. Зрнич и Р.И. Довиак [16]. То, как развивалось данное направление в Советском Союзе, хорошо и полно отражено в книге А.Г. Горелика [5]. Поэтому здесь достаточно сказать лишь о том, что общепризнано измерять два спектральных параметра эхо-метеоцели: среднюю радиальную скорость составляющих ее частиц и ширину спектра указанных скоростей. Оценивать указанные параметры можно либо уже упоминавшимся методом парных импульсов или обработкой сигнала в частотной области, для перевода в которую сейчас разработано множество методов дискретного преобразования [4].

Внедрение спектрального анализа в практику радиометеорологических наблюдений явилось своевременным ответом на сформировавшиеся к тому времени требования к обеспечению безопасности полетов авиации, вызванных увеличением скорости и габаритов летательных аппаратов. К идентифицируемым некогерентными радиолокаторами опасным явлениям погоды (град, гроза, интенсивные осадки) добавляются специфические явления, связанные с повышенными значениями и/или изменчивостью ветра. К таковым относятся:

- зоны сильного ветра;
- мезоциклоны (торнадо);
- фронты порывистости;
- области сдвига ветра;
- зоны повышенной турбулентности;
- микрошквалы.

Сказанное иллюстрируется рис. 2, 3. На рис. 2*а* хорошо просматривается зона сильного ветра на дальности 20 км к юго-западу от радара, а на рис. 2*б* — зона сильного сдвига ветра в направлении на северо-запад и расстоянии около 50 км, не выделяемые на карте отражаемости (рис. 2*а*).

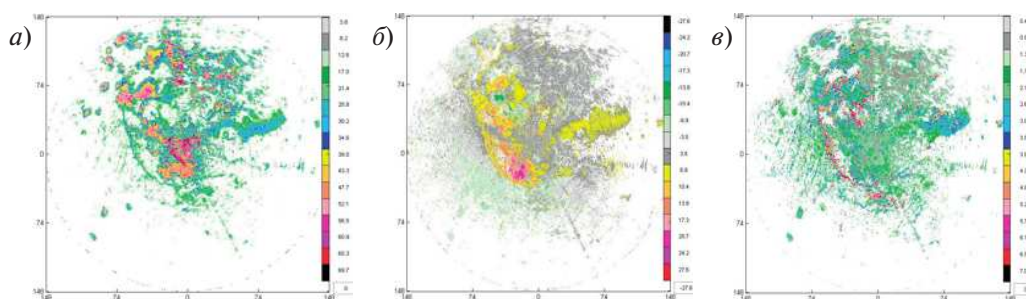


Рис. 2. Карты отражаемости (*а*), радиальной скорости частиц (*б*) и ширины спектра их скоростей (*в*), полученные одновременно от одного метеообъекта.

На рис. 3 можно наблюдать случай обнаружения торнадо в точке с координатами (18 км; 40 км), в которой на карте радиальных скоростей видно изменение скорости ветра на противоположное, а на карте ширины спектра наблюдаются повышенные значения.

Особенно важно, но и наиболее трудно, обнаружение микрошквалов — резких нисходящих движений холодного воздуха в облаке. Они очень опасны для самолетов, идущих на посадку. Поэтому в США радиолокаторы сети TDWR, отвечающей за освещение метеобстановки в районе аэропорта, ежеминутно прерывают свою работу и делают один скан на малом угле места для выявления неоднородностей и оценивания дивергенции поля радиальных скоростей вблизи земли, по которым выявляется возможность возникновения микрошквалов. К счастью, в России из-за более холодного климата данная проблема гораздо менее актуальна.

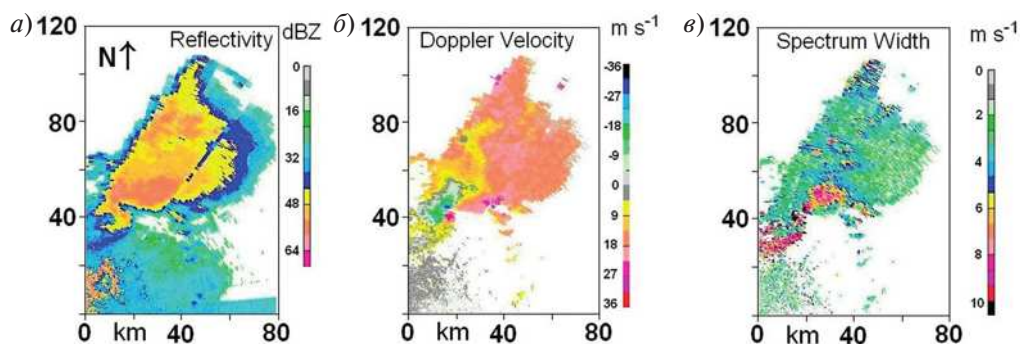


Рис. 3. Карты распределения в приземном горизонтальном слое отражаемости (а), радиальных скоростей (б) и ширины спектра (в).

Главная проблема доплеровской метеоролокации состоит в том, что измеряется только радиальная составляющая скорости частиц, в то время как интерес представляет восстановление вектора их полной скорости. Поэтому много усилий прилагалось к разработке методов оценивания последней. Наиболее радикальный способ — измерять радиальную скорость в одной точке пространства синхронно сразу тремя или, в случае расположения этой точки на малой высоте, двумя радиолокаторами. Данная идея просуществовала недолго и была отвергнута по двум причинам:

1. Существенное различие в расположении импульсных объемов радаров, участвующих в измерениях. При обычной для них ширине луча в 1 градус поперечный размер элемента разрешения уже на удалении 60 км составляет 1 км. В то же время продольный размер, определяемый длительностью зондирующего импульса, равного обычно 1 мкс, равен 150 м. При пересечении объемов такой формы их общая часть составляет лишь малую часть всей величины. В результате каждый из радаров оценивает среднюю радиальную скорость частиц в собственном пространстве, имеющем мало общего с остальными;
2. Значительные технические трудности, возникающие при синхронизации работы локаторов и совмещении центров импульсных объемов, в которых ведутся измерения.

Другая возможность — использовать для восстановления полного вектора скорости закономерные изменения его радиальной составляющей при повороте антенны. Так, если ветер в горизонтальном слое обозреваемого пространства постоянен, его проекция на ось луча антенны описывает при ее вращении «восьмерку» в соответствии со следующим выражением:

$$V_R = V \cos(\alpha - \varphi), \quad (4)$$

где  $V$  — модуль вектора скорости частиц;  $\alpha$  — направление вектора скорости;  $\varphi$  — азимут антенны.

Измеряя таким образом среднее значение в нескольких горизонтальных слоях, можно восстановить вертикальный профиль ветра. Но таким образом можно оценивать только среднее по пространству значение вектора скорости. На практике же часто представляет интерес восстановление поля ветра в каком-либо горизонтальном слое или измерение вектора скорости ветра в какой-то одной точке. В этом случае окружающее пространство разбивается на области, внутри которых ветер считается постоянным [6]. Размер данных областей ( $D$ ) выбирается из требований к подробности восстановления поля, особенностей решаемых задач и т.д. Пример решения подобной задачи приведен на рис. 4.

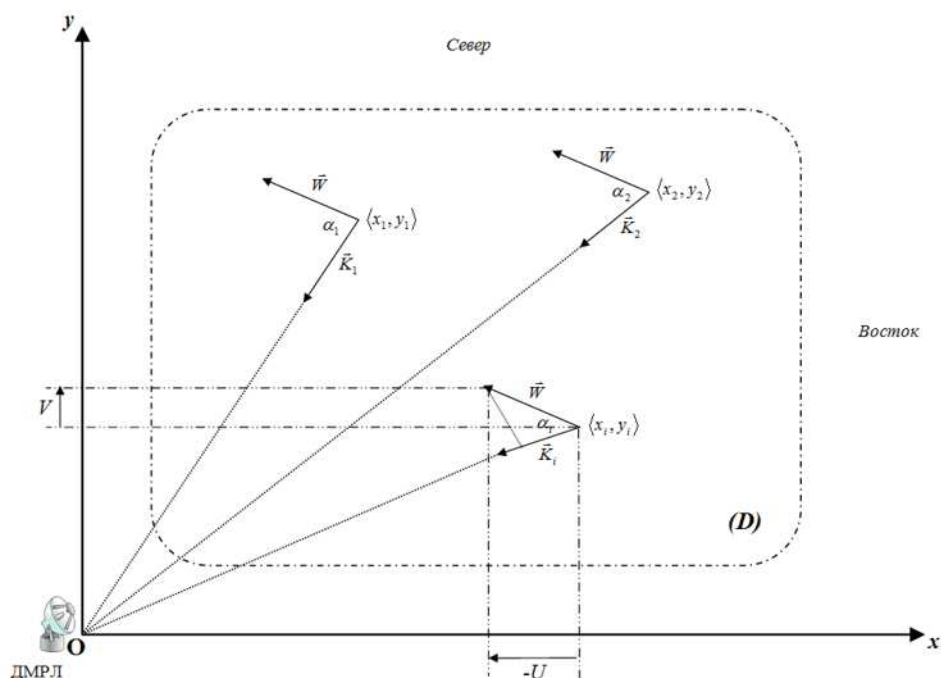


Рис. 4. Иллюстрация к постановке задачи получения оценок вектора скорости фактического ветра  $\vec{W} = \langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle$  по значениям его радиальной скорости  $\vec{K}_i$  в точках с координатами  $\langle x_i, y_i \rangle$ .

Задача заключается в получении оценки скорости фактического ветра ( $\vec{W} = \langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle$ ) по известным (измеренным с помощью доплеровского радиолокатора) оценкам  $\vec{K}_i$  – значениям радиальных скоростей  $\vec{K}_i$  в точках с координатами  $\langle x_i, y_i \rangle$ . Решается она минимизацией методом наименьших квадратов функции:

$$F = \sum_{i=1}^n \left( f(\tilde{U}, \tilde{V}, i) - \tilde{K}_i \right)^2, \quad (5)$$

что приводит к решению системы уравнений:



$$\begin{cases} \tilde{U} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} - \tilde{V} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} = \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{x}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \\ \tilde{U} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} - \tilde{V} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} = \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{y}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \end{cases} \quad (6)$$

Пример восстановления ветра с величиной области  $D 8 \times 8$  км представлен на рис. 5.

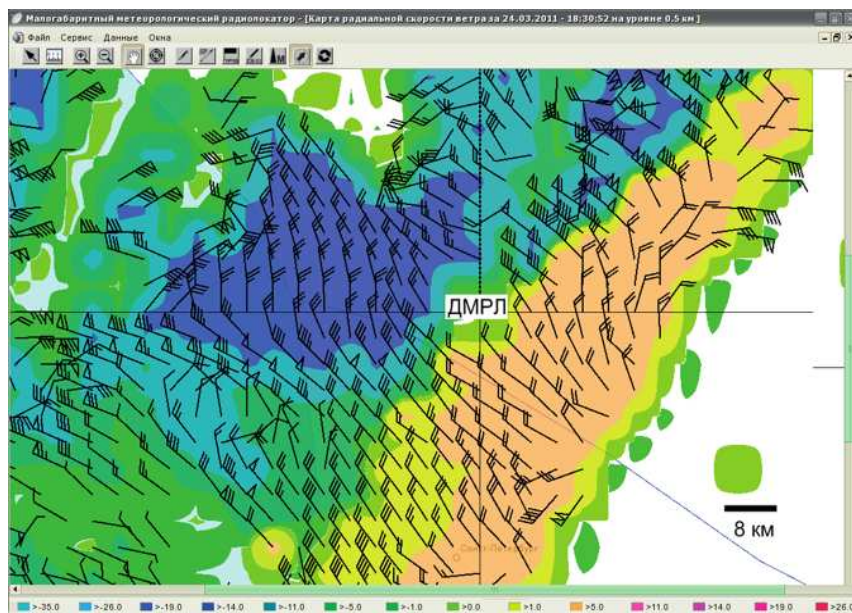


Рис. 5. Рассчитанное по результатам доплеровских измерений поле ветра на высоте 0,5 км.

Следующим шагом в развитии метеорологической радиолокации стало внедрение в ее практику поляризационных измерений. В отличие от спектрального анализа, аппарат которого к моменту его применения в метеорологии был хорошо разработан, в области поляриметрии теоретические исследования и их внедрение в практику наблюдений велись почти параллельно. Наибольший вклад в развитие данной области науки внесли специалисты ВКА им. А.Ф. Можайского. Первые эксперименты по измерению поляризационных характеристик сигнала, отраженного от земной поверхности, проводились на кафедре радиолокации еще в 60-е гг. под руководством Ю.А. Мельника. Далее развитие теории связано с именами Д.Б. Канарейкина, В.А. Потехина, М.Е. Варганова и др [10]. Применением полученных результатов для наблюдений в области метеорологической радиолокации занимался В.Д. Степаненко. Первые работы по применению поляризационных измерений в это же время проводились в ЦАО А.Б. Шупяцким [5].

После перехода Ю.А. Мельника на работу в ГГО им. А.И. Воейкова, там начинаются эксперименты по применению поляризационных методов для различения фазового состояния гидрометеоров и ставится первый эксперимент на базе МРЛ-2 с включенным в волноводный тракт ферритовым переключателем. Развитие теории поляризационных измерений в трудах А.В. Рыжкова и В.М. Мельникова, продолженные потом в США под руководством Д.С. Зрнича [17, 18], определило следующие параметры сигнала, подлежащие оцениванию поляриметрическим радаром:

1. Дифференциальная отражаемость  $Z_{DR}$ . Значение данного параметра зависит от размера частицы, ее формы, ориентации, плотности и содержания воды и обладает следующими свойствами:

- пропорциональна среднему размеру капель;
- очень эффективна для различения дождя и снега, поскольку снежинка имеет гораздо меньшую дифференциальную отражаемость, чем дождевая капля той же формы и ориентации;
- низка для сухого снега и велика для мокрого снега
- сухой град большого размера с неустойчивой ориентацией имеет низкую  $Z_{DR}$ , в то время как тающий град с более устойчивой ориентацией характеризуется очень высоким ее значением.

Совместно с обычной отражаемостью позволяет идентифицировать следующие наблюдаемые объекты:

- сухой град, снег, которым соответствуют малое значение отражаемости  $Z$  и близкое к нулю значение дифференциальной отражаемости  $Z_{DR}$ ;
- мокрый град — большое значение  $Z$  и нулевое  $Z_{DR}$ ;
- 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  $Z_{DR}$ .

2. Дифференциальная фаза  $\Phi_{DR}$  применяется для:

- измерения интенсивности дождя, в чем гораздо эффективнее обычной отражаемости ввиду независимости от распределения частиц по размерам. В результате на нее практически не влияет ослабление в осадках, наличие большого града и частичное блокирование луча;
- распознавания агрегатного состояния частиц в осадках ввиду того, что аналогично дифференциальной отражаемости зависит от размера и ориентации гидрометеоров и, в результате, имеет меньшую величину в снеге, нежели в дожде;
- для калибровки радиолокатора при измерении обычной отражаемости, т.к. не является энергетическим параметром и, следовательно, не зависит от настроек приемного тракта.

3. Модуль коэффициента взаимной корреляции  $\rho_{hv}$ .

Исключительно информативный классификационный параметр, т.к. близок к единице для подавляющего большинства гидрометеоров и значительно меньше ее для



неметеорологических целей таких, как местники, насекомые, птицы, поднятая ветром пыль, искусственные отражатели.

Кроме того, применим для различения мокрого снега и тающего града от тех же частиц в сухом состоянии, поскольку для первых имеет значение меньшее, чем для вторых.

Практическая ценность поляризационных наблюдений заключается в:

1. Улучшении качества радарных измерений, что включает в себя:
  - автоматическую самокалибровку радара;
  - надежную коррекцию сигнала на ослабление в осадках;
  - устойчивость к частичному блокированию луча препятствиями;
  - очень эффективное распознавание и фильтрация сигналов от неметеорологических рассеивателей (местники, птицы, насекомые и т.п.).
2. Уникальной способности автоматического распознавания типа гидрометеоров, состоящей в:
  - детектировании града с высокой точностью;
  - различении дождя и снега;
  - выявлении зон обледенения.
3. Качественный прорыв в понимании микрофизических процессов в облаках и осадках, что приведет к коренному улучшению микрофизической параметризации в мезомасштабных моделях погоды.

Кроме этого использование поляризации в радиолокационных наблюдениях открывает дополнительные возможности в области обеспечения безопасности полетов, а именно:

1. Краткосрочный прогноз конвективных явлений на основе раннего детектирования восходящих потоков за счет использования  $Z_{DR}$ .
2. Надежное измерение высоты нулевой изотермы (по  $Z_{DR}$  и  $\rho h\nu$ ).
3. Определение града на больших высотах в облаках (по  $Z_{DR}$  и  $\rho h\nu$ ).
4. Определение зон ледяных кристаллов на вершинах облаков (кристаллы засасываемые в двигатель могут действовать как «наждак»).
5. Определение зон потенциального обледенения выше нулевой изотермы.

На рис. 6, 7 представлены иллюстрации сказанного. Карты конических разрезов дифференциальной отражаемости и модуля коэффициента взаимной модуляции, на которых отчетливо видна область таяния в районе нулевой изотермы, приведены на рис. 6.

Рис. 7 посвящен обнаружению области града, которую поляризационные методы обнаруживают непосредственно в отличие от косвенных некогерентных методов, выявлявших только возможные зоны его образования.

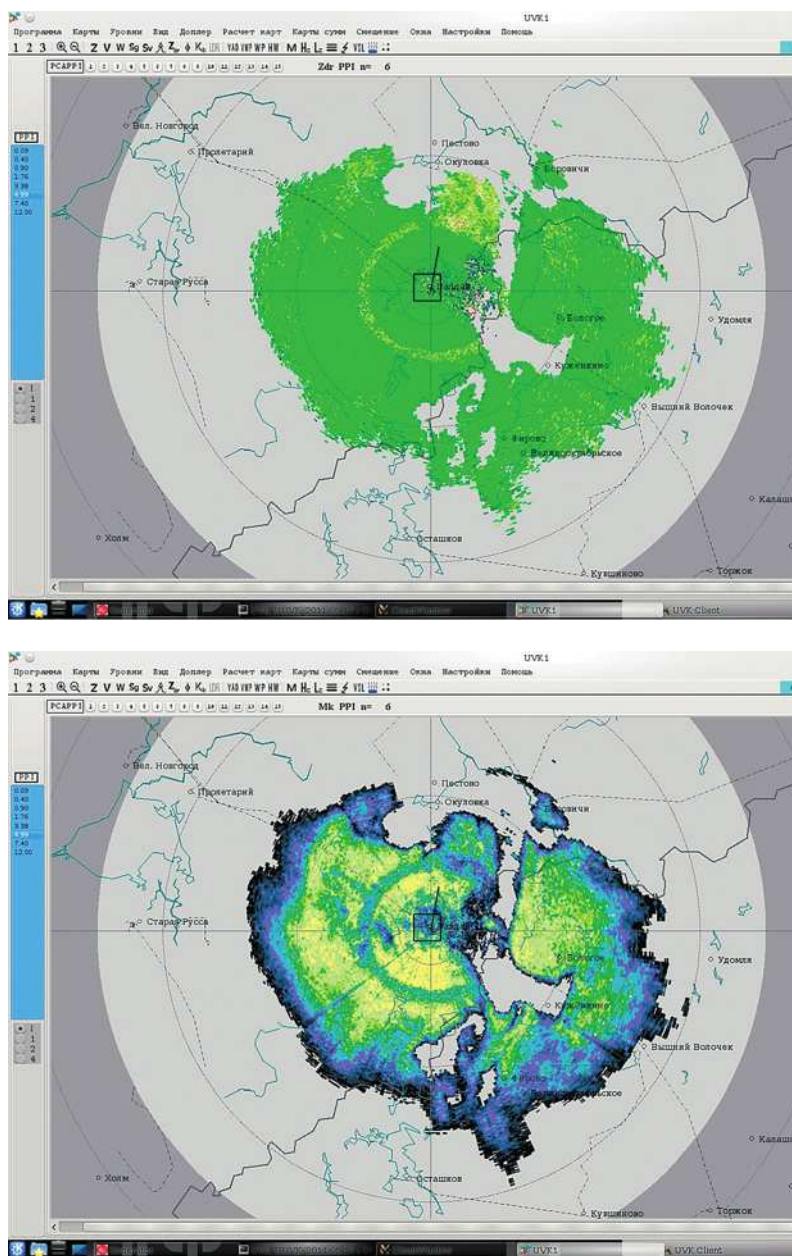


Рис. 6. Карты дифференциальной отражаемости (вверху) и модуля коэффициента взаимной корреляции (внизу).

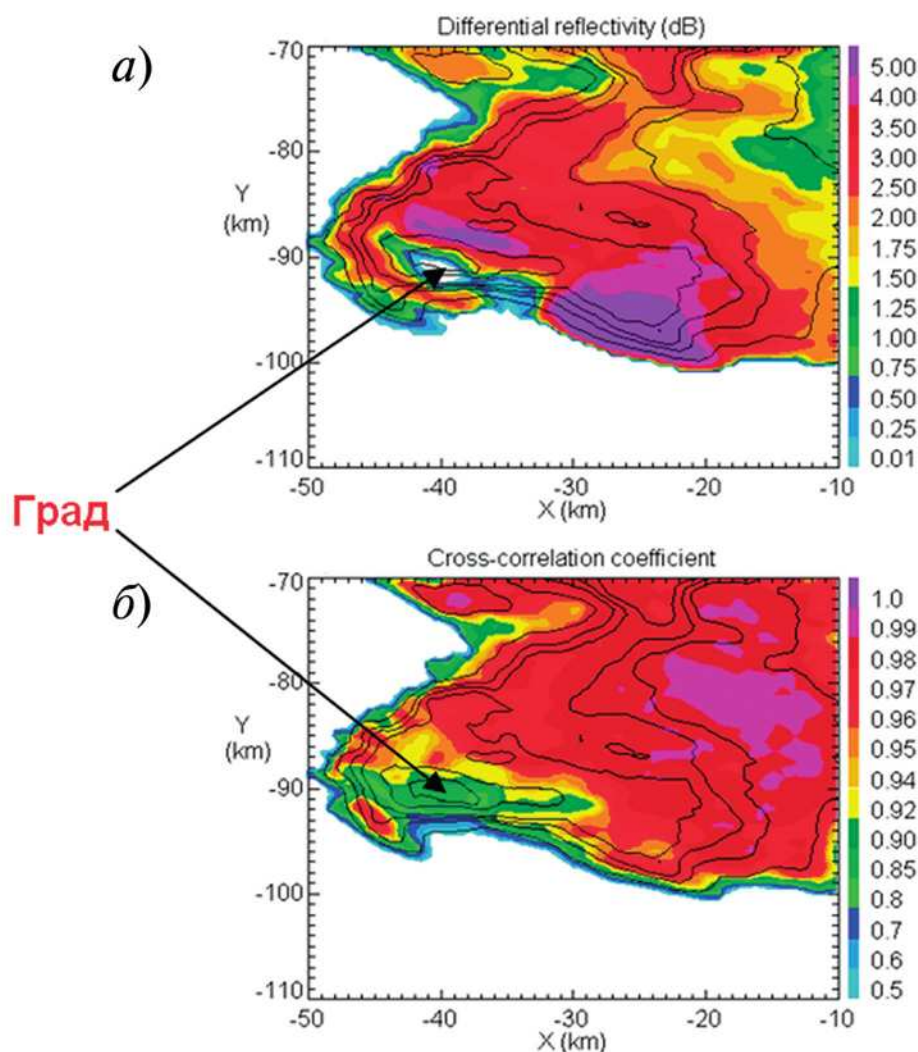


Рис. 7. Карты дифференциальной отражаемости (а) и модуля коэффициента взаимной корреляции (б), иллюстрирующие обнаружение града.

К новейшим достижениям в области метеорологической радиолокации следует отнести внедрение в практику оперативных наблюдений технологии сжатия широкополосного сигнала. Особенно приятно отметить тот факт, что первенство здесь принадлежит России, которая с 2011 г. приступила к переоснащению сети штормоповещения новыми радаром ДМРЛ-С разработки ОАО «НПО «Лианозовский электромеханический завод». Характерной особенностью последних является использование в них сложного зондирующего импульса длительностью 60 мкс с

последующим сжатием его в системе обработки до 1 мкс. Такая технология впервые применяется в стационарном метеорологическом радиолокаторе, предназначенном для оперативной работы. Возможным это стало благодаря созданию разработчиком сигнала с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ), устранившей основной барьер на пути применения сложных широкополосных сигналов при работе с объемно распределенными целями – высокий уровень боковых лепестков на выходе оптимального фильтра.

В результате эквивалентная мощность излучения составляет 900 кВт при реальной мощности излучения 60 кВт. Это значительно увеличило метеорологический потенциал локатора и позволило добиться средней наработки на отказ более 3000 ч, что дало возможность длительной работы аппаратуры в автоматическом режиме без участия человека.

Помимо штормооповещения, т.е. обнаружения опасных явлений погоды и своевременного предупреждения их наступления, перед метеорологической радиолокацией всегда стояла отдельная, имеющая большое народнохозяйственное значение, задача измерения параметров осадков. Наиболее важным среди них является интенсивность. Появление доплеровских и поляриметрических метеорадаров привело к тому, что к традиционным методам оценивания интенсивности осадков [3, 8] (по мощности отраженного сигнала, по затуханию радиоволн на трассе передатчик-приемник и по величине собственного излучения атмосферы) добавились следующие:

1. Измерение интенсивности осадков по оценке энергетического спектра отраженного сигнала. Метод работает только при вертикальном расположении луча антенны. В этом случае локатор измеряет скорость свободного падения частиц, величина которого функционально связана с их размером. Это приводит к следующему алгоритму оценивания [1]:
  - по полученной реализации сигнала, отраженного от исследуемого объема пространства, рассчитывается энергетический спектр  $p(\omega)$ , где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота гармоники;
  - энергетический спектр пересчитывается в распределение капель по размерам  $n(r)$  в единице объема, где  $r$  – радиус капли;
  - вычисляется интенсивность осадков в соответствии с формулой:

$$I = \frac{4}{3} \pi \int_0^{\infty} v(r) n(r) r^3 dr, \quad (7)$$

где  $v(r)$  – скорость падения капли радиусом  $r$ .

По точности данный метод превосходит все остальные и сравним с точностью традиционных методов измерения. Главный его недостаток – невозможность оценивать параметры осадков на большой территории из-за того, что антенный луч должен быть установлен вертикально. Поэтому применять его в больших и дорогостоящих радиолокаторах экономически неэффективно. Однако сейчас разработаны специальные, основанные на рассмотренном методе измерения, гораздо менее габаритные и более дешевые приборы для использования в автоматических метеостанциях. Пример тому – автоматический бесконтактный осадкомер «Капля».

2. Измерение интенсивности осадков по величине затухания и дифференциальной фазе отраженного сигнала. Метод недавно разработан и в оперативной практике пока не применяется. Реализация его возможна только в поляриметрических радиолокаторах. В отличие от традиционного метода оценки по мощности отраженного сигнала, где затухание используется для корректировки оценки отражаемости, по которой рассчитывается искомая интенсивность осадков, здесь сама оценка затухания является «сырьем» для дальнейших расчетов. Суть его состоит в том, чтобы использовать зависимость затухания отраженной частицами волны  $A$  от интенсивности осадков  $I$  на пути ее распространения [19]. Данная зависимость имеет вид:

$$I = c_1(t) c_2(\lambda) A^{1,03}, \quad (8)$$

где  $c_1(t)$  и  $c_2(\lambda)$  — коэффициенты, зависящие от температуры частиц  $t$  и длины волны несущего колебания локатора  $\lambda$ .

Величину ослабления на дальности  $r$  находят из профиля радиолокационной отражаемости  $Z(r)$  в соответствии с выражением:

$$A(r) = \frac{[Z(r)]^b C(b, PIA)}{J(r_1, r_2) + C(b, PIA) J(r, r_2)}, \quad (9)$$

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

$C(b, PIA) = \exp(0,23 b PIA)$ ;  $r_1$  и  $r_2$  — начальная и конечная дальности участка с наблюдаемыми осадками;  $b$  — постоянный коэффициент, величина которого лежит в пределах 0,6–0,9 и зависит от длины волны радиолокатора;  $PIA$  — интегральное ослабление на участке, занятом осадками.

Величина последнего нам заранее неизвестна, для ее оценивания используется его зависимость от дифференциальной фазы:

$$PIA(r_1, r_2) = \alpha [\Phi_{DP}(r_1) - \Phi_{DP}(r_2)], \quad (10)$$

где величина постоянной  $\alpha$  определяется частотой несущего колебания и может корректироваться в процессе измерений по получаемым оценкам дифференциальной отражаемости  $Z_{DR}$  на участке луча от  $r_1$  до  $r_2$ .

Таким образом, поляризационный метод использует 3 радарных параметра вместо одного при традиционном подходе. За счет этого достигается:

- увеличение точности измерений до расстояний 200 км;
- на близких расстояниях (до 100 км) ошибка измерений уменьшается вдвое, что признано самым значительным прорывом в измерении дождя за всю историю использования радаров в метеорологии.

Кроме этого, он обладает следующими важными преимуществами, вытекающими из того факта, что измеряемые параметры неэнергетические:

- устойчивостью к частичному блокированию луча;
- отсутствием необходимости калибровать радиолокатор.

Помимо рассмотренного параметра интенсивности интерес представляют следующие параметры осадков:

1. Вид осадков. Имеется ввиду их разделение на жидкие, твердые и смешанные. Для этого не существует каких-либо иных технических методов, кроме радиолокационных. Особенно значимо прогнозирование града, широко применяемое в службах градозащиты. Большое значение имеет также распознавание жидкой фазы частиц, расположенных в области отрицательных температур, позволяющее своевременно выявить зоны возможного обледенения летательных аппаратов. В ряде случаев возможна и более подробная классификация наблюдаемых целей.

Некогерентные радиолокаторы неспособны непосредственно определять вид наблюдаемых осадков. Здесь используются косвенные методы, основанные на разнице радиолокационной отражаемости частиц воды, находящихся в разных фазовых

состояниях. Множитель  $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|$ , входящий в формулу для расчета радиолокационной

отражаемости цели равен 0,93 для воды и 0,197 для льда с единичной плотностью [13]. Соответственно мощность отражений от жидких и твердых осадков с одинаковым размером частиц различается почти на два порядка.

В основе поляриметрических методов селекции осадков лежит эффект сжатия капли воды в вертикальной плоскости при ее свободном падении в атмосфере [14]. Это приводит к тому, что ее отражательные способности для волн с горизонтальной поляризацией больше, чем для вертикально поляризованных. Следовательно, дифференциальная отражаемость данной цели положительна и тем больше, чем больше отношение полуосей эллипса вращения, в который она превращается. Поскольку степень деформации капли прямо пропорциональна ее размерам, по величине дифференциальной отражаемости можно судить о среднем размере частиц, составляющих осадки.

Твердые частицы либо имеют форму, близкую к сферической (например, град) либо вытянутую форму, но хаотично ориентированы в пространстве (снежная крупа). И в том, и в другом случае ни одна из поляризованных волн не получает преимущества. В итоге, дифференциальная отражаемость созданных такими целями отражений близка к нулю.

Наиболее хорошие результаты дает использование сразу двух параметров: радиолокационной ( $Z$ ) и дифференциальной ( $Z_{DR}$ ) отражаемостей. Это позволяет идентифицировать следующие метеоцели:

- сухой град, снег, которым соответствуют малое значение отражаемости  $Z$  и близкое к нулю значение дифференциальной отражаемости  $Z_{DR}$ ;
- мокрый град — большое значение  $Z$  и, как правило, близкое к нулю  $Z_{DR}$ ;
- слабый или средний дождь — средние значения обоих параметров;
- сильный дождь, ливень — большие значения обоих параметров.



2. Протяженность и продолжительность осадков. В этой области преимущество радиолокационных методов бесспорно. Только с их помощью можно определить площадь, на которой выпадают осадки в интересующий момент времени или длительность их существования в выбранной точке пространства.

В некогерентной радиолокации за осадки принимаются все отражения, получаемые в слое от 0 до 1 км. Линейный размер области, занимаемой этими отражениями, в интересующем направлении и есть в данном случае протяженность осадков.

Радары с двумя поляризационными каналами имеют возможность разделять наблюдаемые цели на метеорологические и иные. Так, по значению дифференциальной отражаемости идентифицируются и исключаются из рассмотрения следующие объекты, часто попадающие в зону видимости локатора:

- скопления птиц или насекомых, которым соответствуют очень большие значения  $Z_{DR}$ ;
- местные предметы (местники), характеризующиеся отрицательными значениями  $Z_{DR}$ .

Более радикальными способностями в делении целей на метеорологические и иного происхождения обладает коэффициент взаимной корреляции. Его значение близко к единице для первых и гораздо меньше ее для вторых. Это дает возможность дополнительно к уже перечисленным объектам наблюдения распознавать пыльные бури, пассивные помехи и т.д.

3. Структура осадков или распределение составляющих их частиц по размерам. Способностью измерять структуру осадков обладают только когерентные метеорологические радиолокаторы и только при вертикальном расположении луча антенны. Принцип их работы уже был рассмотрен при описании методов измерения интенсивности осадков.

В заключение хотелось бы наметить наиболее вероятные, на наш взгляд, пути дальнейшего развития метеорологической радиолокации. В первую очередь это совершенствование методик обработки уже имеющегося материала. В частности, явно не исчерпаны все возможности спектрального анализа эхо-сигналов метеообразования. Большие перспективы открываются здесь в области исследования многомодальных спектров и изучения информативности карт распределения по пространству ширины спектра радиальных скоростей частиц [7]. В области использования поляризационных характеристик сигнала мы находимся лишь в начале пути. Так, новые радиолокаторы ДМРЛ-С, в больших количествах устанавливаемые сейчас на сеть Росгидромета и на аэродромах, хоть и измеряют данные характеристики, но никак не учитывают их при распознавании явлений погоды, продолжая использовать для этого методические разработки 20-летней давности, созданные еще для некогерентных радаров.

Во-вторых, это комплексирование радиолокационных измерений с данными других устройств дистанционного зондирования атмосферы (грозопеленгаторы, приборы измерения напряженности электрического поля и т.д.). Особенно большие возможности открываются при одновременном наблюдении метеообразований

пассивно-активной радиолокационной станцией (ПАРЛС), состоящей из радара со встроенным в него СВЧ радиометром [11].

В-третьих, представляется перспективным применение активных фазированных решеток, что позволит значительно увеличить темпы обзора пространства и тем самым повысить оперативность получаемой информации. Успешные работы в этом направлении уже ведутся в нашей стране в Центральной аэрологической обсерватории [2] и в США в Национальной лаборатории сильных штормов (г. Норман).

В-четвертых, необходимо отметить явно набирающее силу направление создания малых метеорологических радиолокаторов. Современное развитие техники позволяет создавать такие радары с потенциалом мало отличающимся от потенциала больших локаторов. Гораздо меньшая стоимость и удобства эксплуатации способствуют перспективности их разработки.

И, наконец, заманчивые перспективы сулит внедрение в практику метеорологических наблюдений такого новшества, как многопозиционная радиолокация. Это активно развивающееся в классической радиолокации направление способно значительно повысить точность проводимых измерений и придать им новое качество. Например, с ее помощью можно будет вернуться к идее непосредственного оценивания полного вектора скорости частиц.

### Литература

1. Автоматический бесконтактный осадкомер (АБО) «Капля». Руководство по эксплуатации.
2. Азаров А.С., Егоров А.С., Суханов Е.С., Чиркунова Ж.В., Орешкин В.И., Лялин К.С. Бортовой метеорологический радиолокатор со сжатием радиоимпульсов. // Труды 28-го Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 2013, вып. 10, т. 2, с. 309–317.
3. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. — Л.: Гидрометеиздат, 1967.
4. Вовшин Б.М., Лаврукевич В.В., Пушков А.А., Вылегжанин И.С. Результаты натурных испытаний российского метеорадиолокатора «ДМРЛ-С». // Сборник статей Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Харьков, МРФ-2011, т. 1, ч. 1, с. 7–12.
5. Горелик А.Г. Пути развития зарубежной и отечественной доплеровской радиолокации. Московская государственная академия приборостроения и информатики, 1995.
6. Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Шукин Г.Г. Допплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21, с. 66–75.
7. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала. // Труды 28-го Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 2013, вып. 10, т. 2, с. 337–344.
8. Загорин Г.К., Кутуза Б.Г. Особенности переноса поляризованного теплового излучения в облаках и осадках. // Радиотехника, 1998, вып. 10, с. 32–31.
9. Иванов И.И., Колосков Б.П., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Радиолокационный метод исследования пространственной структуры турбулентности в облаках и осадках. // Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Под ред. А.А. Черникова. — М.: Гидрометеиздат, 1978, с. 37–40.
10. Козлов А.И., Сарычева В.А. Поляризация сигналов сложных транспортных радиоэлектронных комплексов. — СПб., 1994.
11. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков и туманов. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 342 с.
12. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М., 1969.

13. 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.
14. Рыжков А.В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации. // Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 18–28.
15. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. — Л., 1973.
16. Doviak R.Y., Zrnic D.S. Doppler Radar and Wether Observation Press, 1984.
17. Melnikov V.M., Zrnic D.S. (2007) Autocorrelation and cross-correlation estimators of polarimetric variables. J. Atmos. Oceanic Technol., 24, 1337–1350.
18. Zrnic D.S., Ryzhkov A.V. Polarimetry for Weather Surveillance Radars. // Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 80, no. 3, March 1999, 389–406.
19. Ryzhkov A., Diederich M., Zhang P., Simmer C. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. February 13, 2013. Submitted to the Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.