

Применение методов метеорологической многопараметрической радиолокации для распознавания опасных явлений погоды.

В. Ю. Жуков, Г. Г. Щукин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

Описываются возможности метеорологических радиолокаторов, отдельно некогерентного, доплеровского и поляриметрического, для решения задачи своевременного распознавания опасных явлений погоды. Рассматриваются особенности применения оцениваемых ими параметров для распознавания как явлений, входящий в список обнаруживаемых и выводимых на карту опасных явлений, так и других, обнаружение которых возможно пока только путем анализа получаемых радиолокатором карт различных параметров принимаемого сигнала.

Describes the capabilities of meteorological radars, separately incoherent, Doppler and polarimetric, to solve the problem of timely recognition of weather hazards. Features of application of the parameters estimated by them for the recognition of phenomena included in the list of detected and mapped hazards, and others, detection of which is possible only by analyzing the radar maps received by the various parameters of the received signal.

Введение

Современный метеорологический радиолокатор – сложная техническая система, обладающая большим арсеналом средств получения информации об окружающем пространстве. Излучая электромагнитную энергию и принимая создаваемые различными объектами, встречающимися на пути ее распространения, отражения, он определяет, прежде всего, координаты этого объекта – его дальность, азимут и угол места. Первая определяется по величине задержки принятого импульса (т.к. метеорологический радиолокатор, как правило, импульсный) относительно излученного. Две другие равны угловым координатам антенного луча на момент приема отраженного сигнала. Поскольку наблюдаемые объекты – это объемно распределенные цели, вся зона обзора разбивается на элементы разрешения – зоны пространства с угловыми размерами, равными размерам луча антенны, и продольным размером равным или чуть большим пространственной протяженности излучаемого импульса (рис. 1).

Стандартный режим работы метеорологического радиолокатора – сканирование пространства по азимуту с пошаговым поднятием антенны после полного оборота. В результате каждый элемент разрешения находится в луче антенны некоторое время, в течение которого от него отражается целая пачка импульсов. Какой характер имеет эта пачка, и какую информацию она несет, зависит от типа радиолокатора. Всего этих типов три:

1. Некогерентный. В нем принимаемая пачка – это всего лишь отсчеты амплитуды импульсов. По ним может быть определен только один параметр сигнала – мощность. Ее величина зависит как от параметров цели, так и от характеристик радиолокатора (мощности излучения, коэффициента усиления антенны, коэффициента шума приемника). Поэтому мощность пересчитывают в параметр, связанный только с характеристиками метеобъекта – радиолокационную отражаемость. По тому, как она распределена в пространстве можно судить о грозо- и градоопасности облака, интенсивности осадков, возможности появления шквала и смерча.

2. Когерентный. Этот тип радиолокаторов способен фиксировать изменения фазы несущего колебания сигнала, происходящую от импульса к импульсу в случае, если цель движется. В результате, к мощности добавляются еще два параметра сигнала, называемых спектральными:

– средняя скорость изменения фазы, определяемая средней скоростью частиц в направлении на радиолокатор;

– среднеквадратическое отклонение этой скорости (или ширина спектра), характеризующее степень упорядоченности движения частиц в наблюдаемом элементе разрешения.

Это дает возможность определять среднюю скорость воздуха на любой из наблюдаемых высот, восстанавливать вертикальный профиль ветра, находить зоны повышенной турбулентности, неоднородности поля ветра и т.д.

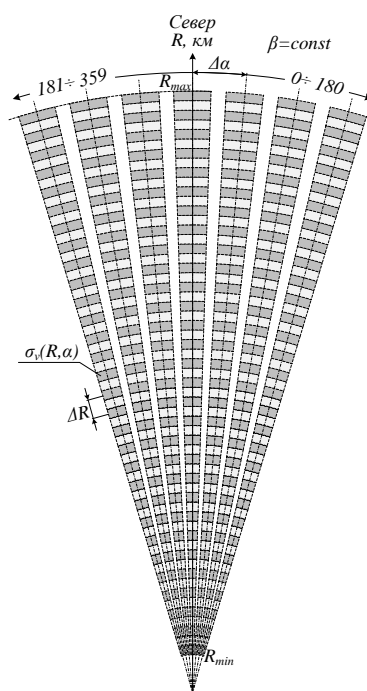


Рис. 1. Схема расположения элементов разрешения в пространстве.

3. Поляриметрический, являющийся одновременно и когерентным. Такой радиолокатор как бы объединяет два радиолокатора (иначе, два канала), работающих на общую антенну. Один из них излучает и принимает горизонтально поляризованные волны, другой – вертикально поляризованные. В результате, к мощности и спектральным параметрам, измеряемым одним из каналов, например, первым, добавляется оценка мощности, получаемая во втором, и оценка коэффициента взаимной корреляции пачек из каждого канала. Последняя разделяется на две составляющие – модуль и фазу этого коэффициента. По оценкам мощности находят дифференциальную отражаемость объекта, равную отношению мощности горизонтально поляризованной волны к мощности вертикально поляризованной. Таким образом, получают еще три параметра, называемые поляризационными, позволяющие решить множество задач – дистанционно определять агрегатное состояние наблюдаемых гидрометеоров, находят зоны тающих ледяных частиц, определять, является ли цель метеорологическим объектом или чем-то иным и т.д.

Теперь перечислим опасные явления погоды, входящие в список распознаваемых отечественным радиолокатором ДМРЛ-С:

- Сильный ливень или снегопад.
- Гроза.
- Град.
- Шквал.

– Смерч.

Рассмотрим особенности применения описанной выше информации для распознавания каждого из них.

Методы распознавания опасных явлений

Ливень или снегопад. Для распознавания данного явления требуется измерять интенсивность наблюдаемых осадков и фиксировать превышение ею некоторого порогового значения. Для этого, прежде всего, надо идентифицировать наблюдаемую цель как осадки. Это не представляет особого труда – за осадки принимается любая объемно распределенная цель, расположенная ниже уровня 1 км. С измерением интенсивности все гораздо сложнее. Наиболее распространен метод, основанный на предположении о том, что размеры частиц в осадках распределены по закону Маршалла-Пальмера. Тогда радиолокационная отражаемость Z цели и интенсивность I связаны следующим соотношением

$$Z = AI^b, \quad (1)$$

где A и b – коэффициенты, величина которых зависит от вида осадков – жидкие они, твердые или смешанные.

В некогерентных радиолокаторах он определяется по температуре воздуха в контролируемом пространстве, т.е. «на глазок». Поляриметрический же имеет возможность четкого определения агрегатного состояния частиц. Она возникает из-за того, что жидкие капли при падении сплющиваются по вертикали. Поскольку размер частиц в горизонтальной плоскости становится больше, чем в вертикальной, мощности сигналов, принимаемых каждым из каналов, изменяются соответствующим образом. В случае же, если частицы твердые, их форма близка к круглой или они ориентированы случайным образом, что обеспечивает равенство мощностей в каналах. Критерием здесь служит нахождение величины дифференциальной фазы отражений около 0 дБ. Жидкие частицы формируют сигнал с положительной дифференциальной отражаемостью до 5 дБ.

Однако определения агрегатного состояния частиц для решения поставленной задачи недостаточно. Есть вероятность наблюдения твердых частиц, покрытых пленкой воды. Особенности электромагнитной волны используемого в метеорологических радиолокаторах диапазона таковы, что на ее отражение влияет лишь тонкий поверхностный слой объекта. Очевидно, что в рассматриваемом случае гидрометеор приобретает отражательную способность воды, а размер его оказывается больше, чем у капли воды, в которую он обратится после того, как полностью растает. Это ведет к появлению значительной ошибки в измерениях. Для ее исключения обращают внимание на модуль коэффициента взаимной корреляции, который имеет свойство иметь значение в пределах 0,98 – 1 для жидких и твердых частиц и падать ниже этого интервала при наблюдении тающего льда. На рис. 2 приведен пример того, как на основе анализа перечисленных параметров сигнала на карте явлений погоды в единой зоне осадков выделяются области с жидкими, твердыми и тающими гидрометеорами, выделенные красным, синим и желтым цветом соответственно.

Кроме этого, в настоящее время широко применяются методы оценивания интенсивности осадков, основанные на измерении дифференциальной фазы отражений, как иначе называют фазу коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала. В основу положен тот же принцип использования сплющивания капель при падении, в результате чего условия распространения для горизонтально и вертикально поляризованной волны становятся различными. Это, в свою очередь, приводит к разнице в набеге фаз поляризационных составляющих. Величина этой разницы зависит от размера капель и от их концентрации, т.е. напрямую

от искомой интенсивности осадков. Точность новых методов в два раза выше, чем у традиционных, но применимы они только к жидким осадкам.

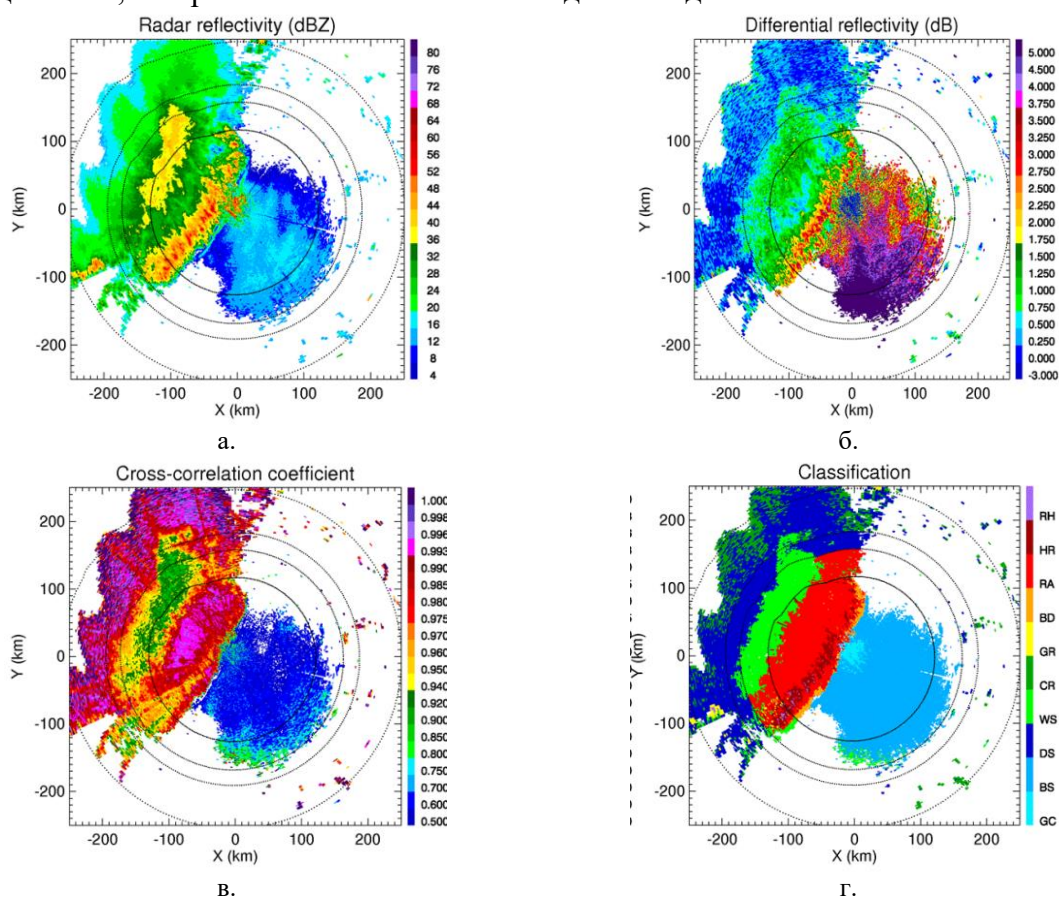


Рис. 2. Карты радиолокационной отражаемости (а), дифференциальной отражаемости (б), модуля коэффициента взаимной корреляции (в) и явлений погоды (г) зоны осадков.

Гроза. Это явление, методы обнаружения которого остаются в наибольшей степени консервативными, основанными только на оценках радиолокационной отражаемости. Ни когерентный, ни поляризационный режимы до сих пор не смогли чем-либо помочь в данном направлении.

Размеры молниевых разрядов и время их существования малы, а координаты и момент наступления непредсказуемы. Поэтому зафиксировать его собственное излучение или наблюдать отражения от молниевых каналов радиолокатор не способен в силу узкой направленности луча своей антенны и малой полосы пропускания приемника. Остается довольствоваться косвенными признаками, заключающимися в оценивании того, насколько наблюдаемое облако близко к грозоопасному состоянию. Разработано несколько методов такого оценивания, наиболее распространенным из которых является критерий Y , определяемый в соответствии с формулой, основанной на статистической обработке и анализе многочисленных данных, [1]

$$Y = H \lg Z_3 \quad (2)$$

где H – максимальная высота радиоэха,

Z_3 – радиолокационная отражаемость на высоте изотермы -22° или примерно на 2 км выше нулевой изотермы.

Превышение им некоторого порогового значения считается показателем того, что облако грозоопасно. Несмотря на то, что используются косвенные признаки, метод на практике показал высокую эффективность применения.

Град. В некогерентной радиолокации для распознавания градоопасности облака применяются тот же критерий Y , что и для распознавания грозы, но с другими пороговыми значениями и условием $H \geq 10$ км. Плюс к этому применяются специфические критерии, к которым, например, относится выполнение неравенства $\lg Z \geq 4$ в любой части облака независимо от значения H [1] и т.п.

Особое значение правильное определение области градообразования имеет место при проведении активных воздействий по защите сельскохозяйственных культур от града. Для этих целей был разработан специальный двухволновый метод его распознавания [2]. В основу положена особенность формирования отражений электромагнитной волны от цели сферической формы, которую примерно имеют большие градины. Эффективная поверхность рассеяния такой цели определяется формулой

$$\sigma = \frac{\pi d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (2)$$

где d – диаметр частиц, из которых состоит метеобразование;
 m – показатель преломления вещества частицы;
 λ – длина волны несущего колебания.

Таким образом, с ростом диаметра градин мощность создаваемого ими отражения растет пропорционально шестой степени диаметра со скоростью, определяемой длиной волны. Но данная зависимость выполняется только до момента, когда длина облучаемой волны и размер градины не станут примерно равными. Далее значение отраженной мощности незначительно колеблется относительно некоторого постоянного значения. Поэтому, если облучать участок метеоцели, состоящей из достаточно малых частиц, одновременно двумя электромагнитными волнами с различными частотами, та из них, чья длина волны меньше, будет давать большую мощность отражений, чем вторая. С увеличением диаметра частиц отраженная мощность первой волны впадет в насыщение, а у второй будет продолжать расти. В момент, когда обе они сравняются, можно утверждать, что наблюдаются частицы диаметром примерно с длину волны первого колебания. На практике применялись длины волн 3 и 10 см. Равенство отраженных мощностей этих волн однозначно указывало на наличие в облаке градин достаточно большого диаметра, чтобы представлять собою опасность.

Применение поляризационных измерений позволяет обнаруживать град по прямым признакам, не прибегая к сложной схеме двухволнового излучения, и даже оценить диаметр наблюдаемых частиц [3]. Для этого используется дифференциальная отражаемость. Как уже описывалось выше, ее значение при отражении от твердых частиц близко к 0 дБ. Другой поляризационный параметр – модуль коэффициента взаимной корреляции – показывает, какой град мы наблюдаем, сухой или обводненный. Это позволяет правильно выбрать параметры в формуле для радиолокационной отражаемости

$$Z = \sum_{i,v} d_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2, \quad (3)$$

где суммирование ведется по единице объема, и по ней вычислить средний размер ядер. Пример наблюдения зоны формирования крупного града представлен на рис. 3.

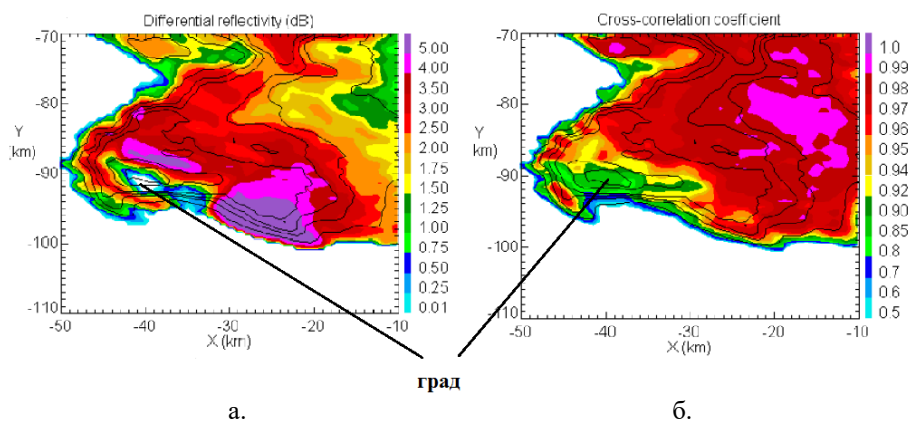


Рис. 3. Пример наблюдения области града на картах дифференциальной отражаемости (а) и модуля коэффициента взаимной корреляции (б).

Шквал. Некогерентными методами оцениваются опять же косвенные признаки существования шквала [1] – наличие полосы плотно расположенных очагов радиоэха, гряда из трех и более очагов и т.п. Непосредственное его наблюдение, как области повышенных значений скорости ветра, возможно только когерентным радиолокатором (рис. 4), [5] т.к. только он способен оценить скорость движения частиц, увлекаемых шквалом. Трудность, возникающая при этом, состоит в том, что оценивается не реальная скорость гидрометеоров, а лишь ее радиальная составляющая, т.е. проекция на ось формируемого антенной луча. Поэтому, когда направление скорости в области шквала близко к перпендикулярному относительно этого луча, распознавание данного опасного явления невозможно.

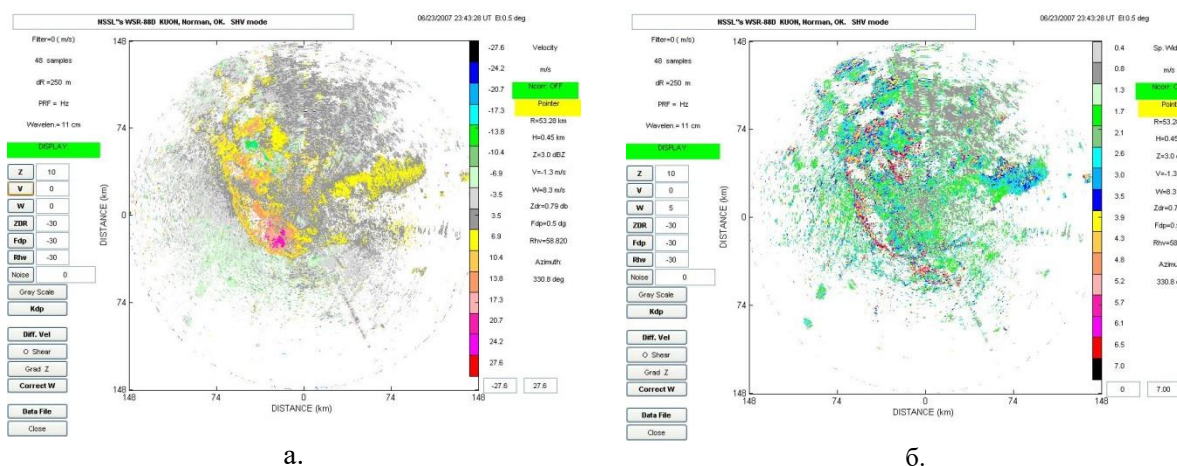


Рис. 4. Пример наблюдения шквала на картах средней радиальной скорости частиц (а) и ширины спектра отражений (б) (75 км к востоку от радиолокатора).

Еще один параметр сигнала, способный помочь в решении поставленной задачи, - ширина спектра принимаемого сигнала. Основанием для этого служит тот факт, что внутри шквала турбулентность воздушного потока существенно превосходит ее значение в окружающем пространстве. Это приводит к расширению спектра отражений от интересующего нас участка, который может быть выделен на карте соответствующего параметра. Однако уверенно идентифицировать его как область шквала невозможно из-за того, расширение спектра может вызываться множеством других причин – образованием в этой области вертикальных потоков, смерча и т.п.

Таким образом, можно констатировать, что шквал по сей день остается явлением, распознавание которого метеорологическим радиолокатором сильно затруднено.

Смерч - еще более труднораспознаваемое явление. Для некогерентных радиолокаторов были разработаны многочисленные признаки его наблюдения на карте радиолокационной отражаемости – появление характерной формы отражений в виде «крюка»; вращение зоны облачности, наблюдаемое на серии последовательно получаемых карт; превышение радиозом высоты тропопаузы на 3 км и т.п. Одновременно с этим признавалось, что зачастую смерчи возникают в тех облаках, которые не подходили ни под один из этих признаков [1].

Когерентный режим не на много улучшает ситуацию. Если радиус смерча не превышает линейного размера элемента разрешения радиолокатора, надежным предиктором его образования служит резкая разница оценок средней радиальной скорости частиц, получаемых в смежных по азимуту разрешаемых объемах. Поскольку горизонтальные размеры смерча могут составлять несколько сотен метров, радиус надежного его распознавания оказывается слишком малым для того, чтобы говорить о значимом повышении вероятности правильного обнаружения этого явления.

При невыполнении упомянутого условия, существует возможность применить второй спектральный параметр сигнала – ширину энергетического спектра. Ее значение резко возрастает при попадании смерча внутрь элемента разрешения за счет большой разницы радиальных скоростей одновременно наблюдаемых частиц, но, как указывалось ранее, такой же эффект дают многие другие явления погоды.

Некоторое улучшение ситуации дает применение оценок поляризационных параметров. Дело в том, что модуль коэффициента взаимной корреляции имеет свойство значительно уменьшать свое значение при наблюдении целей метеорологического характера. Это связано с тем, что капли воды сохраняют свою форму достаточно длительное время, чтобы считать, что флуктуации принимаемых отражений обусловлены только взаимным перемещением частиц. Тогда изменения сигналов, принимаемых по каналам горизонтальной и вертикальной поляризации, происходят синхронно, что и обеспечивает высокое значение коэффициента их взаимной корреляции. Если же наблюдаются частицы метеорологической природы, имеющие, как правило, неправильную форму, на флуктуации сигнала начинают влиять изменения отражательной способности, обусловленные их вращением. Эти изменения происходят независимо в каждом из каналов, в результате чего коэффициент взаимной корреляции уменьшается.

Поэтому, когда смерч достигает такого этапа своего развития, когда начинает засасывать в восходящий поток все, что встречается на его пути – листья, траву, сучья деревьев и т.д. – на карте рассматриваемого параметра образуется пятно пониженного относительно всего фона значения. Пример наблюдения смерча на картах радиолокационной отражаемости и модуля взаимной корреляции приведен на рис. 5 [4].

Помимо «официальных», т.е. указанных в перечне опасных явлений, отображаемых на соответствующей карте, радиолокатор способен распознавать и другие:

- сильный ветер в слое атмосферы;
- вертикальный сдвиг ветра;
- вертикальный поток воздуха;
- пыльная буря;
- скопление птиц и насекомых.

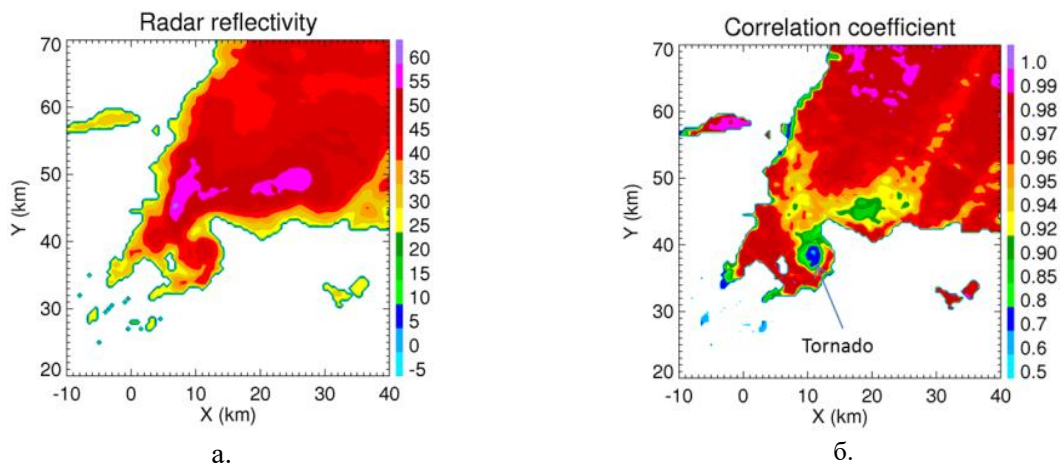


Рис. 5. Смерч на картах радиолокационной отражаемости (а) и модуля коэффициента взаимной корреляции (б).

Сильный ветер в одном или нескольких наблюдаемых слоях атмосферы отличается от уже рассмотренного шквала тем, что в данном случае горизонтальные размеры явления превосходят размеры наблюдаемого радиолокатором пространства. Это делает возможным определение его скорости и направления за счет сканирования антенны по азимуту. Существует достаточно много методов восстановления среднего значения скорости ветра в слое, из которых наиболее распространен метод азимутального дисплея скорости (VAD) [6]. Основан он на том, что угол между осью антенного луча и рассматриваемым нами вектором при вращении антенны изменяется, вследствие чего радиальная скорость частиц изменяется пропорционально косинусу данного угла. В результате отсчеты доплеровского сдвига частоты отражений аппроксимируются функцией

$$\tilde{V}_{Rij} = V \cos(\theta - \alpha_i) \cos \beta_j, \quad (4)$$

где V , θ – величина и направление вектора средней по слою горизонтальной скорости ветра;

α_i , β_j – текущие значения азимута и угла места антенны радиолокатора.

По полученным данным методом наименьших квадратов рассчитывают оценки величины и направления скорости ветра в интересующем нас слое пространства.

Оценивая, таким образом, параметры ветра на разных высотах, получают вертикальный профиль ветра (рис. 6).

Вертикальный сдвиг ветра когерентным радиолокатором может быть обнаружен путем оценивания вертикального профиля ветра. Однако повышенные требования к разрешающей способности применяемой аппаратуры в данном случае оказываются недостижимыми для обычных метеорологических радиолокаторов. Поэтому для подобных измерений изготавливают специальные технические средства – профайлеры. [7].

Однако, как показывают последние исследования [8], радиолокатор может с успехом применять для рассматриваемых целей оценки ширины спектра отражений. Сдвиг ветра, как и любая другая неоднородность векторного поля ветра, порождает отражения, спектр которых существенно отличается от спектра «обычного» сигнала – он становится двухмодальным. В результате ширина этого спектра делается аномально большой, что легко обнаруживается на соответствующих картах. Пример одной из них приведен на рис. 7. По оценкам этих повышенных значений ширины спектра и особенностям их

расположения на карте восстанавливается величина сдвига и высота, на которой он располагается.

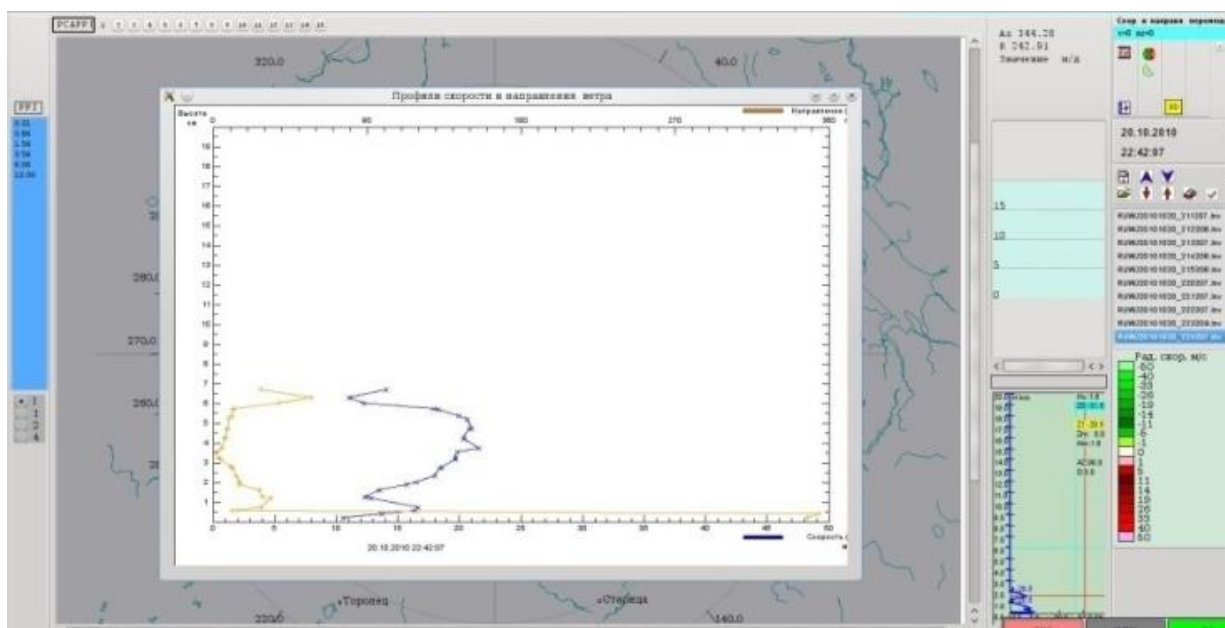


Рис. 6. Вертикальный профиль ветра, получаемый радиолокатором ДМРЛ-С.

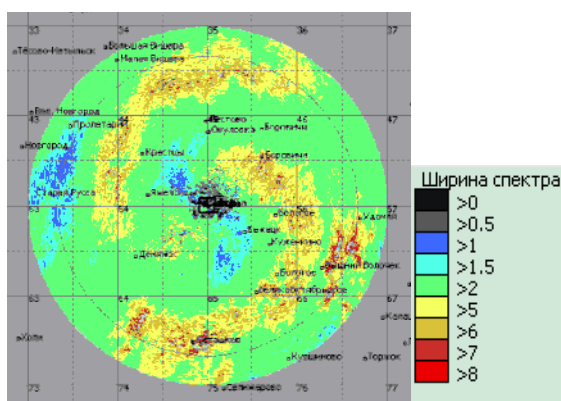


Рис. 7. Карта ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров с зонами аномально широких спектров, порожденных вертикальным сдвигом ветра.

Вертикальные потоки воздуха могут быть обнаружены когерентным радиолокатором по оценкам средней радиальной скорости частиц только на небольших расстояниях, когда его наблюдение происходит при достаточно большом угле места антенны, при котором радиальная составляющая скорости потока, пропорциональная синусу этого угла, принимает достаточно большое значение. На больших же расстояниях, когда антенна направлена почти перпендикулярно потоку, для его распознавания применяют косвенные методы.

Для нисходящего движения частиц (микрорывов) используют дивергенцию поля скоростей при столкновении потока с землей и/или его конвергенцию в верхней части облака, где этот поток формируется [9]. Обе неоднородности приводят к появлению большой разницы оценок средней радиальной скорости частиц, получаемых в смежных по дальности элементах разрешения.

Восходящие потоки в кучево-дождевых облаках распознаются по разрывам в полосе таяния, хорошо наблюдаемой на картах модуля взаимной корреляции.

Кроме того, к вертикальному потоку, являющемуся, как и вертикальный сдвиг, неоднородностью поля ветра, применимы методы, основанные на оценках ширины спектра сигнала с той лишь разницей, что зоны повышенных значений формируются теперь не в горизонтальной, а в вертикальной плоскости [10].

Пыльная буря не может быть распознана ни некогерентным, ни доплеровским радиолокатором. Эффективными здесь могут быть только поляризационные измерения и, прежде всего, оценка модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала. Из-за того, что элементарные отражатели в рассматриваемом случае имеют неправильную форму, флуктуации принимаемых отражений вызываются не только их взаимным перемещением, но еще и их вращением. Как уже говорилось, это приводит к уменьшению значения указанного параметра ниже уровня 0,5.

Вторым параметром, который необходимо принимать во внимание в рассматриваемом случае, является дифференциальная отражаемость. Вследствие хаотической ориентации частиц пыльной бури, его значение будет находится около 0 дБ.

И, наконец, третьим характерным признаком данного опасного явления следует считать большую его протяженность в горизонтальной плоскости в сочетании с непрерывным распределением радиолокационной отражаемости по высоте от нуля до максимального значения.

Скопление птиц и насекомых распознается некогерентным радиолокатором путем межобзорной обработки сигнала – радиозоха птиц перемещается по прямолинейной траектории, направление которой, как правило, не совпадает с направлением ветра [11].

Введение когерентного режима работы дает еще один признак идентификации наблюдаемой цели как птиц – наличие в спектре принимаемого сигнала низкочастотной составляющей, обусловленной взмахами их крыльев [12]. Однако возможность ее надежного выделения в общем спектре сигнала представляется трудно реализуемой на практике задачей ввиду малости ее частоты.

Кроме того, этот метод годится только для птиц. Распознавать же отражения от насекомых некогерентные и доплеровские радиолокаторы практически неспособны.

Гораздо более надежный критерий распознавания дает использование поляризационных характеристик принимаемого сигнала. Прежде всего, это модуль коэффициента взаимной корреляции. Как уже упоминалось, его значение меньше 0,5 – это хороший идентификатор того, что наблюдаемая цель имеет неметеорологическое происхождение.

Одновременно следует использовать оценки дифференциальной отражаемости. Отличительная особенность птиц и насекомых – большое отношение их горизонтального размера к вертикальному. Это приводит к тому, что величина рассматриваемого параметра у отраженного от них сигнала значительно превосходит значение 5 дБ, максимально возможное для водяных капель. Использование двух рассмотренных параметров позволяют однозначно трактовать наблюдаемую цель как птиц или насекомых.

Заключение

Современный метеорологический радиолокатор, являющийся в подавляющем числе случаев когерентным и поляриметрическим, обладает мощным арсеналом средств для дистанционного исследования пространства. В отличие от преобладавших еще 30 лет назад некогерентных радиолокаторов, оперировавших только с одним параметром сигнала – мощностью – теперь он оценивает 6 его параметров. Это позволяет улучшить

качество распознавания тех опасных явлений погоды, что фиксировались на картах некогерентных радаров, и добавит новые, удвоив их общее количество. Однако вероятности правильного обнаружения части из них до сих пор остается на недостаточном уровне. Поэтому остается актуальным поиск новых способов применения имеющихся в распоряжении исследователей параметров сигнала, а также нахождение новых таких параметров.

Литература

1. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993. – 360 С.
2. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты / М.Т. Абшаев, И.И. Бурцев, С.И. Ваксенбург, Г.Ф. Шевела. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 231 С.
3. Bringi, V.N., and V. Chandrasekar. Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications. Cambridge University Press, 2001. – 636 p.
4. Dusan S. Zrnic and Alexander V. Ryzkov. Polarimetry for Weather Surveillance Radars. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 80, No. 3, March 1999, p. 389 – 406.
5. Melnikov V.M. et al. Prospects of the WSR-88D Radar for Cloud Studies. JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY, Volum 50, April 2011, 859–872 p.
6. Довиак, Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Довиак Р., Зрнич Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 С.
7. Стерлядкин В.В., Горелик А.Г., Щукин Г.Г. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: III Всероссийские Армандовские чтения: молодежная школа. – Муром: ВлГМУ, 2013. – С. 24–42.
8. Девяткин А.М., Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г. Восстановление поля скорости воздушных потоков в метеорологической доплеровской радиолокации // Метеорология и гидрология. – 2018. – №1. – С. 107–115.
9. Fujita T.T., McCarthy J., 1990: The application of weather radar to aviation meteorology / Radar in meteorology, D. Atlas (Ed.). – Boston, American Meteorological Society, 1990, pp. 657–681. DOI: 10.1007/978-1-935704-15-7_43.
10. Бычков А.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром: ВлГМУ, 2015. – С. 134–139.
11. Диневич Л.А. Повышение точности селекции радиоэхо птиц // Современные наукоемкие технологии.– № 4. – 2015. – С. 114–125.
12. Руководство по орнитологическому обеспечению полетов в гражданской авиации (РООП ГА-89).