

Радиолокационное распознавание опасных явлений погоды, связанных с ветром

В.Ю.Жуков¹, Г.Г.Щукин².

¹Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

E-mail: vuzhukov2002@list.ru

²Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт,
199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

Описываются принципы работы метеорологического радиолокатора. Определяются основные понятия радиолокации, такие как диаграмма направленности, элемент разрешения и т.д. Кратко объясняется эффект Доплера, понятие энергетического спектра, его характеристики и их информативность. Разбираются методы распознавания таких опасных явлений как зоны сильного ветра, повышенной турбулентности, сдвига ветра, смерча и микрошквала. Приводятся перспективные разработки для обнаружения сдвига ветра и вертикальных воздушных потоков.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, распознавание опасных явлений.

Radar recognition of wind-related weather hazards

V.Y. Zhukov¹, G.G. Shchukin²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² State Research Institute Of Navigation And Hydrography

The principles of operation of meteorological radar are described. The basic concepts of radar are defined, such as a directional diagram, a resolution element, etc...d. Briefly explains the Doppler effect the concept of the energy spectrum, its characteristics and their informativeness. Understand the method recognition of such dangerous phenomena as zones of strong wind, increased turbulence, tornado and microburst. Prospective developments for the detection of wind shear and vertical air flows are presented

Keywords: meteorological radar, recognition of dangerous phenomena.

Метеорологическая радиолокация развивалась параллельно классической, заимствуя ее достижения и, в то же время, оставаясь совершенно специфической частью данной области науки и техники. Одно из основных отличий заключается в том, что ее задача состоит не в обнаружении и наиболее точном определении координат точечной цели, а в получении как можно большего количества информации из заранее выбранных областей окружающего пространства.

Прежде, чем разбираться в том, как это делается, уточним некоторые основополагающие понятия радиолокации. Прежде всего, определим, что такое диаграмма направленности антенны. Наверное, всем известно, что антенна служит для того, чтобы излучать электромагнитные волны в окружающее пространство. Но, кроме этого, она не дает излучаемой энергии разлетаться во все стороны, а концентрирует ее в некотором направлении. Диаграмма направленности как раз и показывает, как происходит это концентрирование. В метеорологических радиолокаторах применяется, как правило, карандашные диаграммы направленности. Это значит, что если мы возьмем

какой-нибудь излучатель и расположим его на оптической оси антенны, мы получим максимально возможную в данном случае мощность принимаемого сигнала. Если мы начнем смещать этот излучатель, например, по координате азимута, т.е. в горизонтальной плоскости, принимаемая мощность будет уменьшаться (при условии, что излучаемая мощность остается постоянной) и, в конце концов, упадет до нуля. Полученный график зависимости мощности принимаемого сигнала от величины отклонения излучателя от оптической оси антенны и есть ее диаграмма направленности (рис. 1). Иногда применяют более понятный, но менее правильный термин «антенный луч». Надо отметить, что диаграмма направленности одинакова, что при приеме энергии, что при ее излучении. Т.е. мы получили бы точно такой же график, если бы антенна излучала сигнал, а смещали бы мы по азимуту приемник.

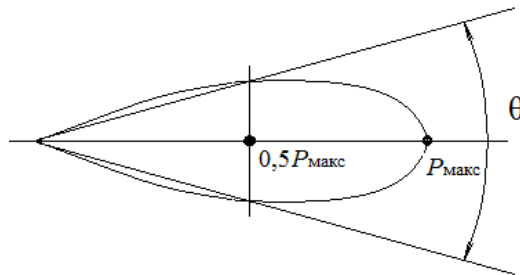


Рис. 1. Пример диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости, θ – ширина диаграммы направленности.

Такой же график можно построить и в вертикальной плоскости. В результате получим описание диаграммы направленности зависимостью $G(\alpha, \beta)$, где α и β – отклонения от оптической оси антенны в азимутальной и угломестной плоскостях [1]. Карандашная диаграмма направленности имеет одинаковую форму по горизонтали и вертикали.

Второе понятие, которое мы должны рассмотреть, называется разрешаемый объем или элемент разрешения. Само понятие «разрешение» может быть вам не понятно. Это предельное значение разности какого-либо вида координат (например, значений азимута) двух целей, при котором они еще могут быть различимы, т.е. восприниматься как две цели. При меньшем значении этой разницы они идентифицируются как одна цель.

В случае метеорологического радиолокатора под элементом разрешения понимается область пространства, внутри которой находятся частицы, отражения от которых формируют принимаемый сигнал. Очевидно, что диаграмма направленности вырезает в пространстве телесный угол, внутри которого распространяется энергия. Это ограничение разрешаемого объема по угловым координатам. По координате дальности размер рассматриваемого объема определяется длительностью зондирующего импульса. Как это происходит?

Рассмотрим отрезок диаграммы направленности, по которому распространяется излученный импульс длительностью $\tau_{\text{и}}$ (рис. 2). Все частицы, попадающие внутрь объема, ограниченного по дальности отрезком дальности $h_{\text{и}}$, занимаемым этим импульсом ($h_{\text{и}} = c\tau_{\text{и}}$, где c – скорость света) отражают падающую на них электромагнитную волну. Частица 1, до которой дошел передний фронт импульса, создает отражение, которое двигаясь по направлению к радиолокатору со скоростью света, суммируется с отражением, создаваемым частицей 2. Далее они обе суммируются

с отражением частицы 3 и так до тех пор, пока не встретится с задним фронтом импульса, после которого заканчивается облучение частиц, а, следовательно, и отражения.

Сигнал, сформированный частицей 1, и задний фронт зондирующего импульса двигались навстречу друг другу с одинаковой скоростью. Следовательно, встретятся они в момент, когда оба пройдут расстояние $h = \frac{c\tau_{\text{и}}}{2}$. Именно это и есть размер элемента разрешения по дальности, т.к. если мы зафиксируем значение принимаемого сигнала в момент прихода рассмотренного нами отражения от частицы 1, оно будет являться суммой отражений ото всех частиц, находящихся в объеме пространства, ограниченном диаграммой направленности антенны и отрезком h по дальности.

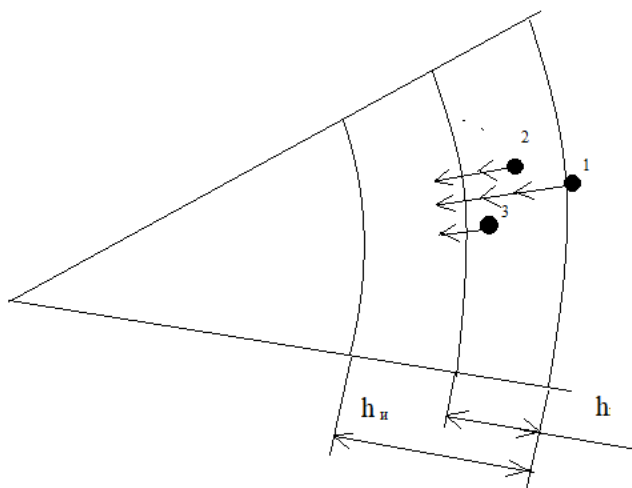


Рис. 2. Определение размера элемента разрешения по дальности.

Теперь рассмотрим, как метеорологический радиолокатор получает информацию об окружающем пространстве. Общепринятый режим его работы – сканирование антенны в горизонтальной плоскости (на все 360° или внутри сектора) с пошаговым поднятием антенны в вертикальной. В программу обзора закладываются значения этих шагов, т.е. значения углов места, на которые должна быть поднята антенна и временной интервал между отсчетами принимаемого сигнала по дальности. Таким образом, радиолокатору заранее задаются координаты всех элементов разрешения, на которые разбивается зона его ответственности (рис. 3).

Получается, что во время обзора просматриваются все означенные элементы и от каждого из них получается пачка отраженных импульсов. Теперь задача сводится к тому, чтобы из этой пачки извлечь как можно больше интересной для нас информации. Самое простое – это вычислить среднюю мощность принятого сигнала и по ней, пользуясь основной формулой метеорологической радиолокации

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{м}}}{R^2} Z, \quad (1)$$

где $P_{\text{пр}}$ – мощность принимаемого сигнала; $P_{\text{ш}}$ – мощность шума (чувствительность) приемника радиолокатора; $P_{\text{м}}$ – метеорологический потенциал радиолокатора, включающий в себя все его основные характеристики; R – дальность цели, определить такой важный метеорологический параметр, как радиолокационная отражаемость Z . Это единственный параметр, который измеряли некогерентные радиолокаторы, что не умаляет его важности. Все современные комплексы тоже его измеряют и получают за счет этого большую часть информации о наблюдаемых метеоявлениях. По сути, он интегральный, т.е. определяется несколькими параметрами цели, но в наибольшей степени зависит от размера частиц, создающих отражения. По его

значениям и особенностям распределения в пространстве рассчитывают интенсивность осадков, высоту верхней границы облаков, их градо- и грозоопасность.

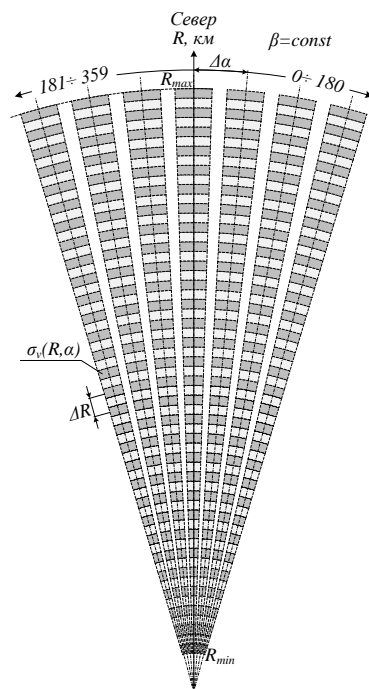


Рис. 3. Фрагмент координационной сетки, получаемой в горизонтальной плоскости.

Однако объектом рассмотрения нашей лекции являются возможности радиолокаторов следующего поколения, называемые когерентными или доплеровскими. Их отличие от некогерентных состоит в способности измерять скорость движения наблюдаемых объектов, основанной на эффекте Доплера. Последний заключается в изменении частоты принимаемого сигнала от частоты излучаемого в случае взаимного сближения или, наоборот, расхождения источника и приемника.

Поскольку данный закон актуален для всех волновых процессов, его удобно объяснять на примере поверхностных волн. Представьте себе, что на озере в тихую погоду какой-то источник создает колебания уровня воды с частотой F . От этого по поверхности озера расходятся волны, движущиеся со скоростью V (рис. 4).

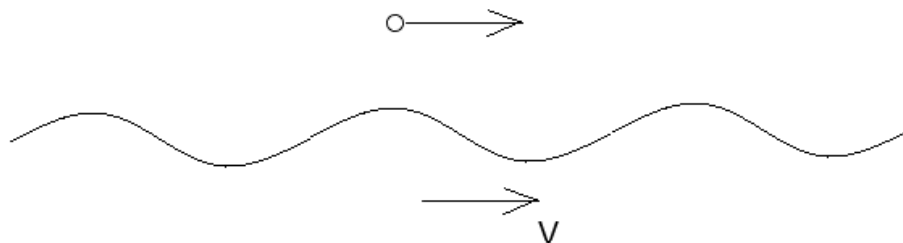


Рис. 4. Проявление эффекта Доплера.

Если мы, как стрекоза, можем зависать на месте, то, глядя строго вниз, будем видеть под собой колебания уровня воды точно с такой же частотой, что и колебания источника. Если же мы начнем двигаться в ту же сторону, что и волна, со скоростью V , то увидим, что волна под нами не колеблется. Это означает, что Доплеровское смещение частоты стало отрицательным и равным по модулю частоте F . Если же теперь мы немного

увеличим или уменьшим скорость, то увидим, что уровень воды под нами снова изменяется, но частота этих колебаний значительно меньше частоты колебаний источника.

Поскольку в цели лекции не входит подробное рассмотрение эффекта Доплера, не будем приводить строгого математического доказательства его существования. Ограничимся только констатацией того, что в радиолокации величина его определяется формулой [1]

$$f_D = \frac{2V_R}{\lambda}, \quad (2)$$

где V_R – радиальная скорость цели (т.е. проекция ее скорости на ось, соединяющую радиолокатор и цель); λ – длина волны радиолокатора.

Таким образом, одиночная цель создает отражение в виде синусоиды с некоторой амплитудой A и частотой, отстоящей от частоты несущего колебания на величину Доплеровского сдвига f_D . Данный сигнал можно представить в виде временной функции (рис. 5), либо в виде δ -функции на оси частот, как это сделано на рис. 6.

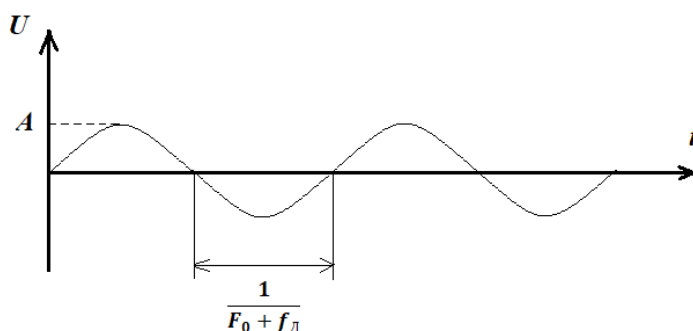


Рис. 5. Временное представление синусоиды.

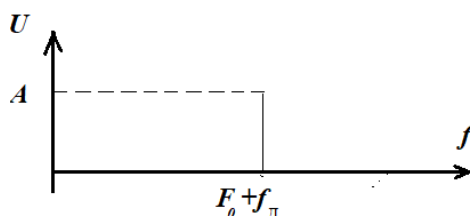


Рис. 6. Представление синусоиды в виде δ -функции на оси частот.

Метеорологическая радиолокация отличается тем, что имеет дело с объемно распределенными целями, состоящими из множества элементарных отражателей. Каждый из них создает синусоиду со своей амплитудой и своим сдвигом частоты, определяемым величиной его радиальной скорости. В итоге, на оси частот мы получаем не одиночную δ -функцию, а совокупность большого количества таких функций на некотором интервале частот. Такая совокупность называется спектром сигнала (рис. 7). Анализируя спектр можно получить много информации о наблюдаемом объекте.

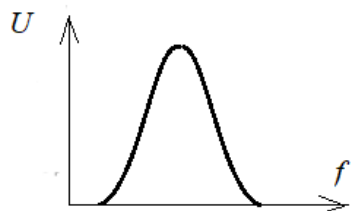


Рис. 7. Пример спектра принимаемого сигнала.

Но в данный момент нас интересует вопрос, как перейти к такому анализу, если в процессе работы радиолокатора мы получаем не спектр, а временную функцию, состоящую из суммы большого числа синусоид. Ответ на этот вопрос дает математика. В ней существует преобразование Фурье, позволяющее представить временную функцию в виде суммы синусоид, что нам и требуется. Формула преобразования имеет следующий вид:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (3)$$

где $S(\omega)$ спектр сигнала; $\omega = 2\pi f$.

Надо уточнить, что анализируется, как правило, не сам спектр сигнала, а его энергетический спектр или, что то же самое, спектральная плотность мощности, определяемый выражением

$$S_s(\omega) = |S(\omega)|^2. \quad (4)$$

Получаемые в процессе обзора пространства оценки спектров могут иметь очень разнообразные и сложные формы, анализ которых есть сложная задача. Поэтому анализируют не форму энергетического спектра, а его параметры – среднее значение F_{cp} и ширину σ . Формулы для их определения следующие:

$$F_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega S_s(\omega) d\omega; \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (\omega - 2\pi F_{cp})^2 S_s(\omega) d\omega}. \quad (6)$$

Применять данные формулы в оперативной работе практически невозможно. Поэтому используют упрощенные методы, основанные на предположении о том, что форма спектра нам известна заранее и является Гауссовой. Это значительно упрощает вычисления.

Рассматривать данные методы сейчас не является нашей задачей. Поэтому сосредоточимся на применении рассмотренных параметров, называемых спектральными, в задачах распознавания опасных явлений, связанных с ветром.

Прежде всего, перечислим данные явления:

- зоны сильного ветра;
- сдвиг ветра;
- зоны повышенной турбулентности;
- смерч;
- микрошквал.

Обнаружение зон сильного ветра затруднено тем, что радиолокатор фиксирует значение не самого вектора скорости ветра, а только его радиальной составляющей. Одинокое измерение этой проекции мало что может нам сообщить, т.к. существует бесконечное множество векторов, способных создать проекцию такой же величины (рис. 8).

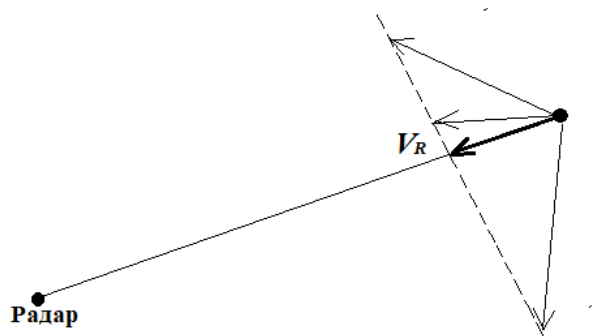


Рис. 8. Иллюстрация того, что по одиночному измерению радиальной скорости частицы невозможно определить ее истинную скорость.

Единственный вывод, который мы можем сделать по результатам одиночного измерения – это то, что истинная скорость ветра будет не меньше полученного значения его радиальной составляющей. Иногда это помогает обнаружить опасные зоны, но далеко не всегда.

Очевидно, что задачу можно решить, измерив еще одну составляющую вектора скорости ветра. Этого можно достигнуть, если организовать синхронную работу двух радиолокаторов, как это показано на рис. 9.

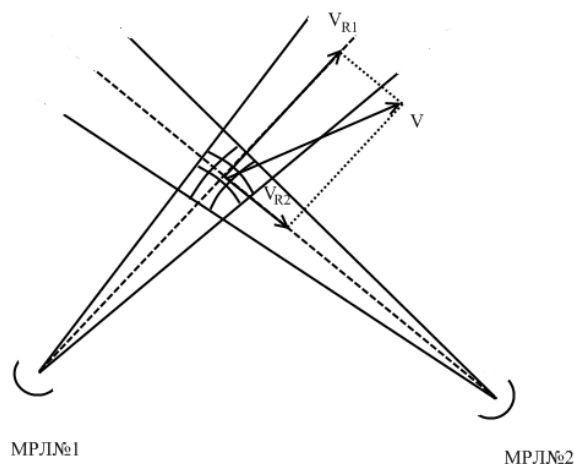


Рис. 9. Схема измерения вектора горизонтальной скорости ветра при помощи двух радиолокаторов.

Однако для реализации этой идеи требуются такие точности установки антенн, которые сейчас практически недостижимы. Кроме того, проведение подобных измерений возможно только в очень небольшом участке пространства, где пересекаются зоны обзора радиолокаторов.

Поэтому идут иным путем – другие проекции вектора скорости ветра получают за счет его наблюдения под разными углами, что имеет место при вращении антенны в горизонтальной плоскости (рис. 10).

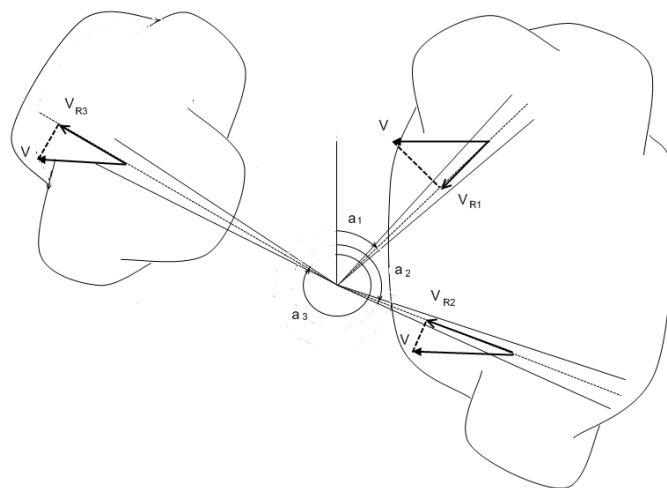


Рис. 10. Изменение радиальной составляющей скорости ветра V_R при сканировании антенны в горизонтальной плоскости.

Необходимое допущение, которое приходится при этом сделать – постоянство скорости ветра во всем исследуемом пространстве. Очевидно, что распространить это

предположение на всю зону действия метеорологического радиолокатора, имеющую, как правило, радиус 250 км, некорректно. Поэтому данный метод применяется в специального вида радиолокаторах, называемых профилемерами или профилометрами. Их задача – определять скорость ветра на различных высотах в области атмосферы, расположенной непосредственно над ними. Пример такой аппаратуры – отечественный профилемер 1Б67 (рис. 11).



Рис. 11. Внешний вид профилера 1Б67.

Получая таким образом информацию о ветре на различных высотах, мы имеем возможность распознать второе перечисленное нами опасное явление – сдвига ветра. Для этого строится высотный профиль скорости и направления ветра, и вычисляются вектора разности между двумя смежными слоями.

Вернемся к большим радиолокаторам и рассмотрим их способность распознавать явление №3 из нашего списка – зоны повышенной турбулентности. Отличительная особенность таких зон – увеличенный по сравнению с другими областями пространства диапазон изменений скорости ветра, а, следовательно, и отдельных отражателей. Это ведет к расширению энергетического спектра, которое и является признаком опасности в просматриваемом элементе разрешения. Пульсации скорости изотропны, т.е. не зависят от направления. Поэтому оценки ширины спектра инвариантны относительно положения антенны. Пример того, как данный параметр помогает в обеспечении безопасности, представлены на рисунке 12 [3].

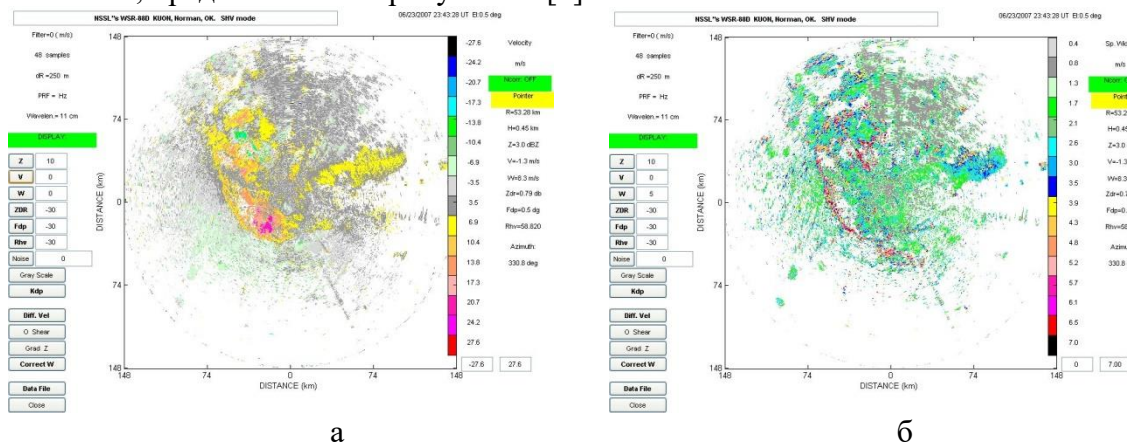


Рис. 12. Карта радиальных скоростей (а) и ширины спектра скоростей (б).

На первой из них (рис. 12а) явно просматриваются три зоны с повышенной скоростью:

- На дальности примерно 60 км на запад узкая полоса, протянувшаяся с севера на юг с примерно нулевыми скоростями перед ней и положительными их значениями после (восточнее) нее. Это фронт порывистости, порожденный холодным воздухом, вытекающим из облаков.

- 20 км западнее и 20 км южнее находится красное пятно с максимальной скоростью 26 м/с;

- Зеленая зона с координатами 60 км на север и 40 км на запад от радиолокатора с максимальной скоростью 15,5 м/с.

По данным карты рисунка 12а наиболее опасным участком следует признать красную зону как соответствующую наибольшей скорости ветра. Однако, карта ширины спектра (рис. 12 б) говорит другое - самой опасной является зеленая зона, т.к. на этой карте она отмечается большими значениями ширины спектра. Это значит, там повышенная турбулентность и, следовательно, большая порывистость ветра. Опасным представляется и фронт порывистости из-за наблюдаемых в нем больших градиентов скоростей

Переходим к очень сложному и плохо распознаваемому явлению – смерчу. Вероятность его правильного обнаружения зависит от соотношения размера смерча с размерами элемента разрешения радиолокатора. Если оно значительно больше единицы, т.е. в область смерча помещается несколько диаграмм направленности антенны то, как это видно из рисунка 13, при ее вращении возникает резкое изменение средней радиальной скорости частиц. В результате, появляется большой градиент Доплеровского сдвига частоты в смежных по азимуту элементах разрешения, что и является признаком наблюдения смерча.

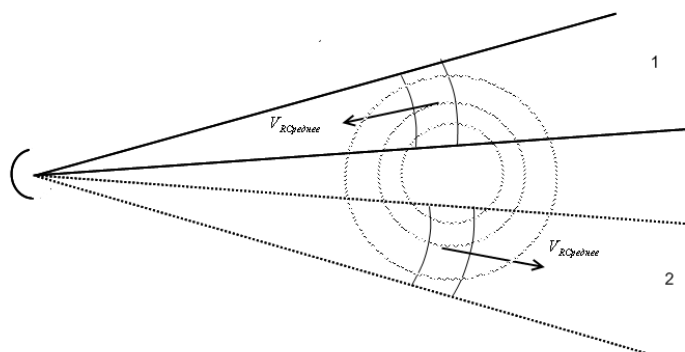


Рис. 13. Схема образования скачка средней радиальной скорости отражений от смерча при перемещении луча антенны в горизонтальной плоскости из положения 1 в положение 2.

К сожалению, описанная ситуация возникает, как правило, на небольших расстояниях от радиолокатора. В остальных случаях попадание смерча целиком внутрь диаграммы направленности вызывает только расширение спектра принимаемого сигнала. Это предупреждает об опасности, но не идентифицирует, какая именно опасность имеется в виду.

Пример наблюдения смерча на картах радиальной скорости и ширины спектра приведены на рисунке 14.

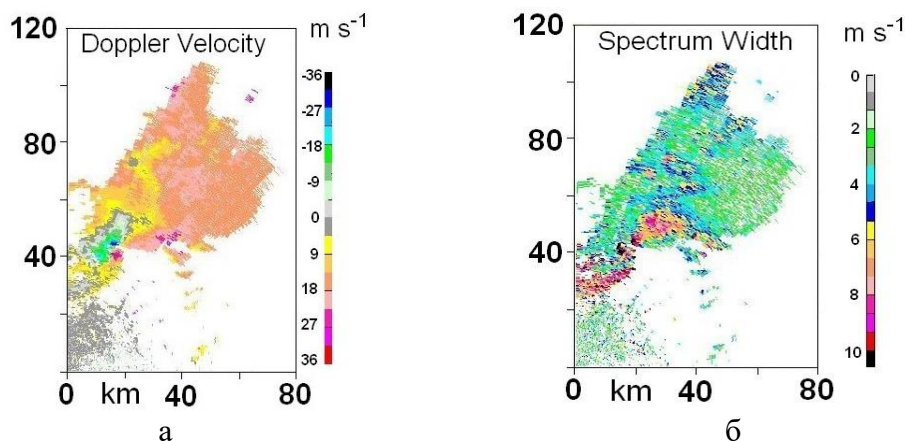


Рис. 14. Пример наблюдения смерча на картах радиальных скоростей (а) и ширины спектра (б).

Упомянутый градиент параметра на карте радиальных скоростей наблюдается в точке с координатами 18 км на запад и 42 км на север от радиолокатора. На карте ширины спектра в этой точке наблюдается значительное увеличение оцениваемой величины.

Для сравнения на рисунке 15 представлена карта радиолокационной отражаемости того же объекта, что и на рисунке 14. Очевидно, что в точке нахождения смерча здесь не видно каких-либо аномалий, позволяющих отнести ее к зоне, представляющей опасность.

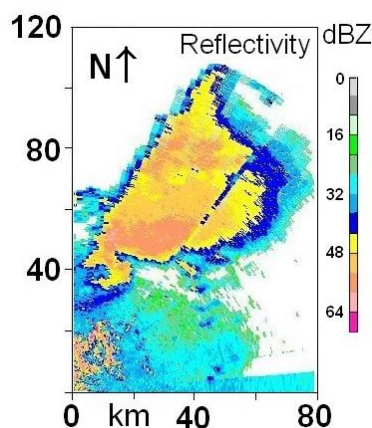


Рис. 15. Карта радиолокационной отражаемости, соответствующая ситуации, представленной на рис. 11.

Последнее опасное явление, которое мы рассмотрим – микрошквал. Это не совсем точный перевод английского слова *microburst*. Явление состоит в том, что в верхней части кучевого облака скапливается холодный воздух, который в какой-то момент начинает стремительно двигаться вниз. Такой кратковременный нисходящий поток представляет большую опасность для воздушных судов, идущих на взлет или посадку.

Главная сложность в распознавании данного явления состоит в том, движение воздуха в нем вертикально и, следовательно, тангенциально по отношению к радиолокатору. Следовательно, как мы уже упоминали ранее, доплеровского сдвига частоты в отраженном от него сигнале не возникает. Поэтому непосредственная идентификация микрошквала невозможна. Однако задача решается путем обнаружения косвенных признаков. К таковым относится растекание падающего потока при контакте его с землей (рис. 16).

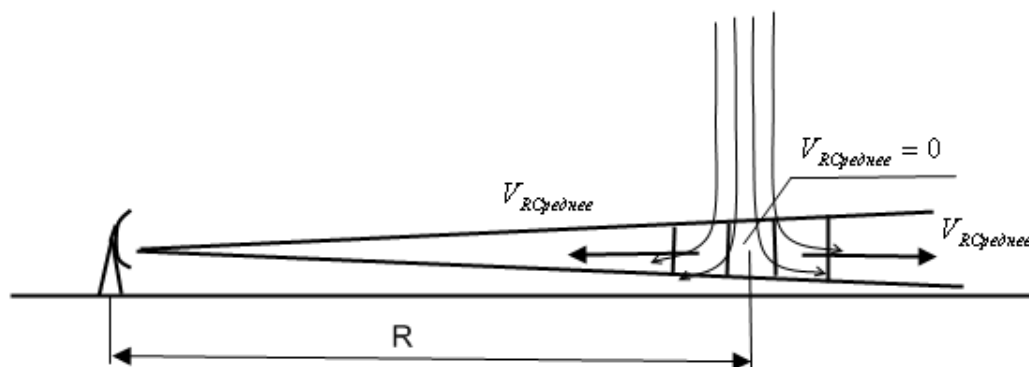


Рис. 16. Схема распознавания микрошквала.

Как видно из рисунка, воздушный поток растекается в разные стороны, в результате чего, как и в предыдущем случае, возникает градиент радиальной скорости, но только теперь не по координате азимута, а по дальности. Именно по его появлению судят о появлении опасности.

Это все, что касается методов, применяемых в настоящее время в практике радиолокационных наблюдений. Далее рассмотрим перспективные методы, находящиеся в стадии разработки. Прежде всего, определим, по каким направлениям идут современные исследования.

Во-первых, из вышеизложенного становится очевидной большая проблема – невозможность организовать распознавание всех связанных с ветром и кучевой облачностью явлений в рамках одного радиолокатора. Для работы по сдвигам ветра приходится устанавливать особые устройства – профиломеры. Это ведет к значительным финансовым затратам и расходам других ресурсов. Поэтому понятно стремление отыскать такие методы обработки получаемой радиолокатором информации, которые позволили бы включить указанное явление в список тех, что он способен распознавать.

Второе направление – преодоление ограничений в распознавании таких явлений как смерч и микрошквал. Сейчас и в том и другом случаях используются косвенные методы, и надежность их распознавания во многом зависит от соотношения масштаба явления и размера антенного луча. В связи с этим актуален поиск новых параметров сигнала, с помощью которых можно было бы уменьшить данную зависимость.

Начнем с первой из указанных проблем. Одно из решений предложили разработчики радиолокатора ДМРЛ-С. Оно состоит в том, чтобы ввести особый режим работы радиолокатора, при котором он занят только восстановлением вертикального профиля ветра. Чтобы иметь возможность распознавать сдвиг ветра, который измеряется в км/с на 100 футов (30 метров) высоты, элемент разрешения радиолокатора должен быть меньше 30 м. Уменьшить до требуемого значения пространственную протяженность зондирующего импульса – задача сложная, но разрешимая. Гораздо сложнее обстоит дело с поперечными размерами разрешаемого объема. Они, как известно, определяются шириной диаграммы направленности антенны и зависят от расстояния. Так вот, дальности, на которых эти размеры попадают в заданный промежуток, оказываются лежащим в ближней зоне Френеля антенны. Это отрезок расстояния, на котором диаграмма направленности еще не сформирована и действуют законы линейной оптики. В связи с этим появляется опасность допущения ошибок в оценивании средней радиальной скорости частиц. Однако по сообщениям разработчиков указанные трудности были успешно преодолены и натурные эксперименты показали хорошие результаты. При всем этом один недостаток в данном решении остается

непреодоленным, а именно расход времени, затрачиваемого на рассматриваемые измерения.

Последние исследования показывают, данного недостатка можно избежать, если искать решение задачи в использовании оценок ширины спектра принимаемого сигнала. Ранее было сказано, что этот параметр может предупреждать об опасности, если принимает повышенное значение, но не способен идентифицировать явление вследствие того, что слишком многие опасные ситуации вызывают это повышение. Однако все это относится к случаям незначительных расширений спектра, достигающих максимум 20 %. Если же спектр становится аномально широким (более 50%), то информативность его резко повышается. И возникают такие спектры именно при наблюдении сдвигов ветра.

Для понимания этого эффекта представим сдвиг ветра как границу между двумя слоями атмосферы, каждый из которых характеризуется своим вектором средней скорости ветра, как это показано на рисунке 17 [4].

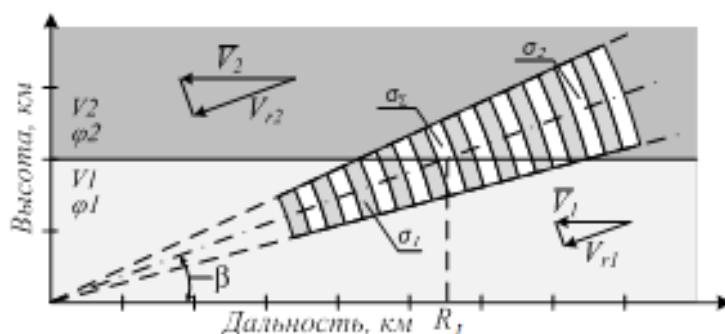


Рис. 17. Схема наблюдения радиолокатором сдвига ветра.

Кроме скорости ветра в каждом из слоев имеет место своя ширина спектра скоростей σ_i и мощность создаваемых отражений P_i . Из рисунка видно, что в некоторые элементы разрешения попадают одновременно участки и первого и второго слоев. При принятой в метеорологической радиолокации Гауссовой аппроксимации спектра принимаемого сигнала суммарный спектр отражений от этих элементов оказывается суммой двух Гауссиан, имеющим два максимума или двухмодальным. Пример такого спектра сигнала, принимаемого с дальности, обозначенной на рисунке 17 R_1 , представлен на рисунке 18.

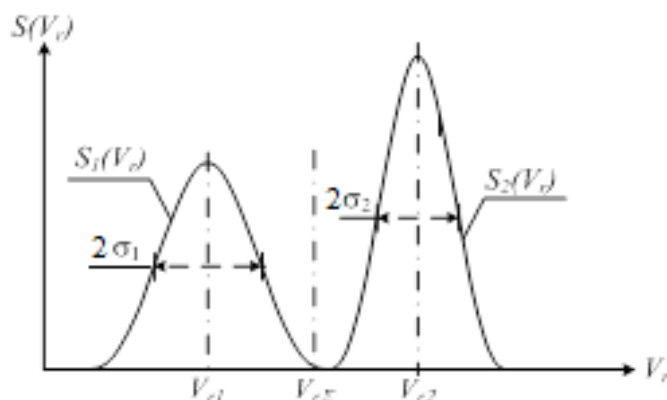


Рис. 18. Спектр радиальных скоростей частиц, расположенных внутри элемента разрешения с координатой дальности R_1 .

Его ширина существенно зависит от соотношения мощностей составляющих. Если одна из них много меньше другой, указанный параметр полностью определяется более мощным сигналом. Если же мощности оказываются примерно равными, то ширина

спектра принимает аномально большое значение, которого невозможно достичь при обычном одномодальном спектре. В итоге, на картах ширины спектра скоростей появляются зоны повышенных аномальных значений. Условиями их появления являются:

1. Расположение элемента разрешения радиолокатора на границе раздела двух атмосферных слоев таким образом, чтобы участки этих слоев, попавших внутрь разрешаемого объема создавали примерно одинаковые, с разницей не менее, чем в два раза, мощности отражений. Это условие хорошо иллюстрируется рисунками 17, 18.

2. Взаимное расположение антенны радиолокатора и векторов скорости ветра в атмосферных слоях было таким, чтобы проекции этих векторов на ось антенны оказались бы направленными в разные стороны, как это представлено на рисунке 19.

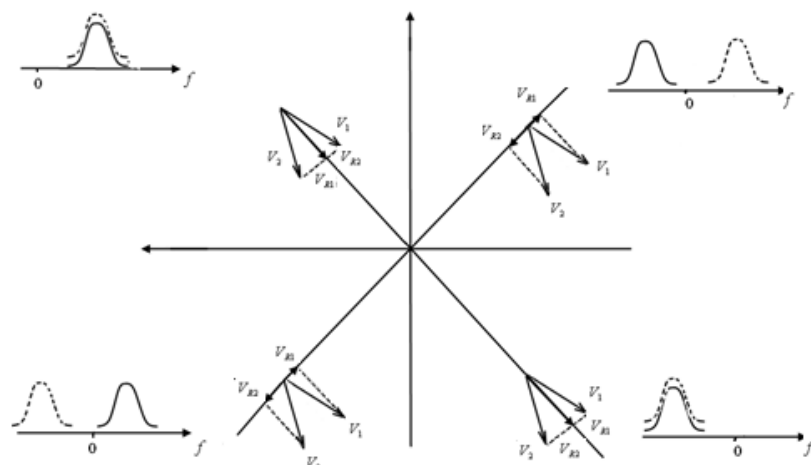


Рис. 19. Схема формирования лвухмодального спектра отраженного сигнала.

Из рисунка явствует, что в зависимости от того, под каким углом радар наблюдает цель, радиальные скорости частиц в двух рассматриваемых нами слоях оказываются то равными друг другу, то максимально разными по величине. Именно в последнем случае спектр становится двухмодальным, т.к. величина радиальной составляющей определяет среднюю частоту спектра отражений. Следовательно, зоны повышенных значений ширины спектра возникают только в определенных секторах по азимуту и в пределах некоторого интервала дальностей. В итоге, если имеет место сдвиг по скорости ветра, они принимают форму, представленную на рисунке 20.

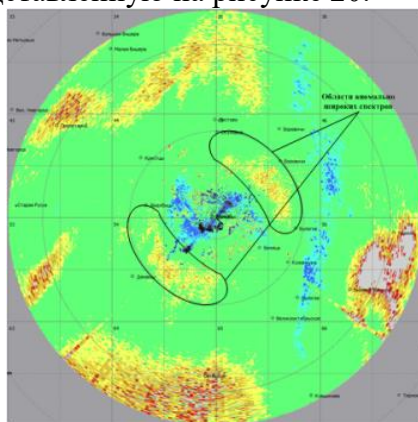


Рис. 20. Карта ширины спектра радиальных скоростей частиц с зонами аномально широких значений при сдвиге по скорости ветра.

и окружающей его области (фона), попадающих в один элемент разрешения, как это видно на рисунке 22.

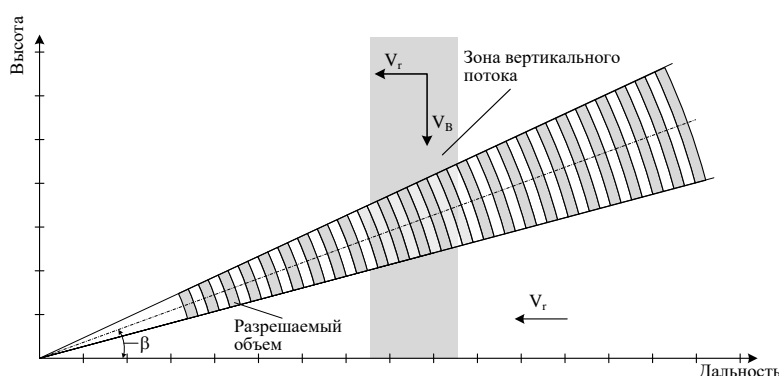


Рис. 22 - Схема наблюдения радиолокатором вертикального потока.

Спектр такого сигнала есть сумма двух Гауссиан, которые в отличие от рассмотренного нами перед этим случая, представленного на рисунке 18, имеют одинаковую среднюю частоту (рис. 23).

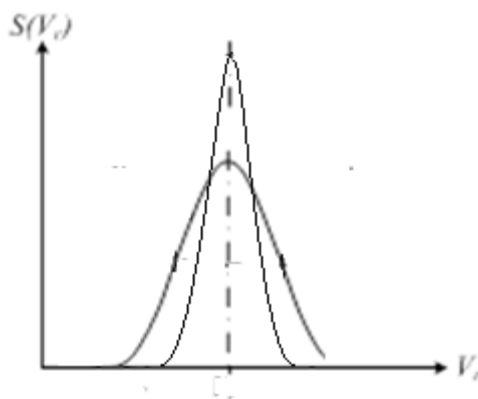


Рис. 23. – Спектр сигнала от элемента разрешения, в который попали области вертикального потока и окружающего пространства.

Очевидно, что никакого аномально широкого спектра в этом случае не образуется. Поэтому для распознавания рассматриваемой ситуации предлагается оценивать параметр b , аналогичный базе сложного импульса, определяемый как произведение ширины спектра принимаемого случайного процесса σ_ω на ширину его корреляционной функции σ_τ [5].

$$b = \sigma_\omega \sigma_\tau. \quad (9)$$

Если в приемник радиолокатора поступают отражения от однородного участка пространства, его спектр имеет Гауссову форму, для которой выполняется условие

$$\sigma_\omega = 1/\sigma_\tau, \quad (10)$$

т.е. его база равна единице. Если же спектр входного случайного процесса становится сложным (состоящим из двух Гауссиан), соотношение (10) нарушается, и чем больше различаются друг от друга значения ширины спектра составляющих, тем больше она отклоняется от единицы. По этому отклонению и можно судить о попадании в зону видения радиолокатора неоднородности поля ветра, вызванной вертикальным восходящим либо нисходящим потоком.

Из выше изложенного следует, что современный метеорологический радиолокатор имеет большой арсенал средств для распознавания связанных с ветром опасных явлений. Однако на данный момент весь его потенциал до конца не раскрыт. Например, до сих пор большую проблему представляют шквалы. Очевидно, что не достигнуты максимумы

в надежности обнаружений и других упомянутых в докладе явлений. Поэтому в данном направлении имеется широкое поле для приложения своих сил и знаний.

Литература

1. Довиак, Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Довиак Р., Зрнич Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 С.
2. 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.
3. Готюр И.А., Девяткин А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией / Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 32. – СПб.: изд. РГГМУ, 2013. С.66-83.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Первушин Р.В., Щукин Г.Г. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2016, №3, с. 68-73.
Денисенков Д. А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Применение параметра «база сигнала» для радиолокационного распознавания опасных явлений / Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69, № 6. – С. 589-592. – DOI 10.31857/S0033849424060126. – EDN