

Обнаружение сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора

Д.А. Денисенков, Г.Г. Щукин, В.Ю. Жуков

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13,
E-mail: vka@mil.ru.*

Сдвиг ветра считается одним из опаснейших для авиации явлений погоды. На его своевременное обнаружение тратится много сил, что подтверждается большим количеством различной применяемой для этого аппаратуры. Известны радиолокационные, оптические, акустические и другие измерители вертикального профиля ветра. Поскольку данное оборудование стоит дорого, естественно возникает желание передать его функции другим приборам, уже установленным в аэропорту. В частности, радиолокационные измерения профиля ветра вполне могли бы быть переданы метеорологическим доплеровским радиолокаторам, которыми снабжается сейчас каждый аэропорт. Однако простая механическая загрузка радаров новыми функциями в большинстве случаев невозможна из-за напряженного режима их работы. Каждые 10 минут радар должен обновлять информацию об окружающей метеобстановке, и на другие измерения просто не остается времени. Поэтому актуально решение проблемы, при котором дополнительная информация извлекается из стандартного набора радиолокационных данных, причем введения каких-либо изменений в уже существующий режим работы не требуется.

Такая возможность открывается при использовании оценок ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров [1]. При наличии сдвига ветра на картах конического разреза данного параметра образуются характерные структуры, представленные на рис. 1.

Было сделано предположение о том, что указанные пространственные распределения параметра есть результат попадания в луч радиолокатора одновременно двух слоев атмосферы с разными скоростями гидрометеоров в каждом из них [2]. Для его проверки было проведено численное моделирование [3], полностью подтвердившее данную гипотезу. На рис 2 представлены расчетные карты, схожие по структуре с реальными.

Для практического использования доказанных зависимостей требуется решить обратную задачу – научиться находить величину сдвига ветра по характеристикам пространственного распределения образующихся при этом зон аномально больших и малых значений ширины спектра радиальных скоростей частиц. Для этого была разработана аналитическая модель рассматриваемых процессов [4].

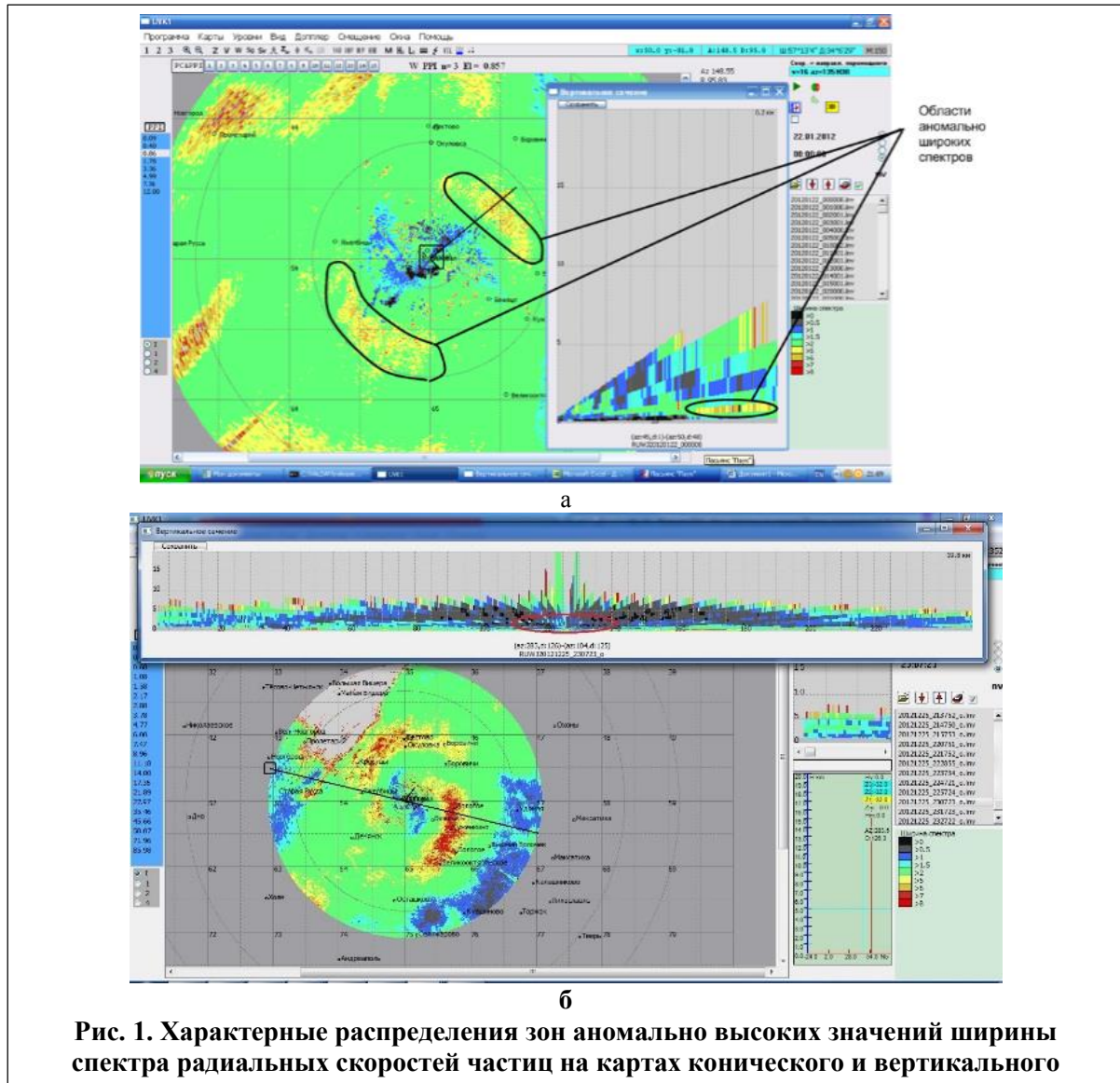
Прежде всего, необходимо разделить все случаи радиолокационного наблюдения сдвига ветра на две части: когда размер разрешаемого объема радиолокатора больше слоя, в котором образовался сдвиг ветра, и когда он превосходит или сравним с последним.

В первом из них фактически имеются два слоя, заполненных гидрометеороами с различными, но постоянными скоростями. При одновременном их попадании в луч антенны спектр суммарного сигнала становится двухмодальным, и ширина его спектра определяется выражением [5]

$$\sigma^2 = \frac{1}{P_1 + P_2} \left[P_1 \sigma_1^2 + P_2 \sigma_2^2 + \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} (F_1 - F_2)^2 \right], \quad (1)$$

где $P_1, P_2, \sigma_1, \sigma_2, F_1, F_2$ – соответственно мощность, ширина спектра и среднее значение спектра отражений от каждого из слоев.

Своего максимального значения данная величина достигает при азимуте антенны, совпадающим с направлением вектора разности средних скоростей, когда разность $(F_1 - F_2)$ оказывается наибольшей. Другая координата – дальность, на которой образуется зона аномально высоких значений рассматриваемого параметра, равна дальности той точки, в которой достигается равенство мощностей обоих принимаемых сигналов.



Отсюда следует достаточно простой алгоритм определения разности средних скоростей частиц в каждом из слоев

$$\widetilde{\Delta V} = \widetilde{V_1} - \widetilde{V_2} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{4\tilde{\sigma}_{\text{макс}}^2 - 2\tilde{\sigma}_1^2 - 2\tilde{\sigma}_2^2}, \quad (2)$$

где знак \sim означает оценку измеряемого параметра,

$\tilde{\sigma}_{\text{макс}}^2$ – наибольшее из наблюдаемых на карте значений ширины спектра сигнала.

Однако для того, чтобы найти искомую величину сдвига ветра, надо еще определить толщину слоя, внутри которого он существует. Для его оценивания достаточно сделать на карте вертикальный разрез в направлении зоны аномально больших значений, как это

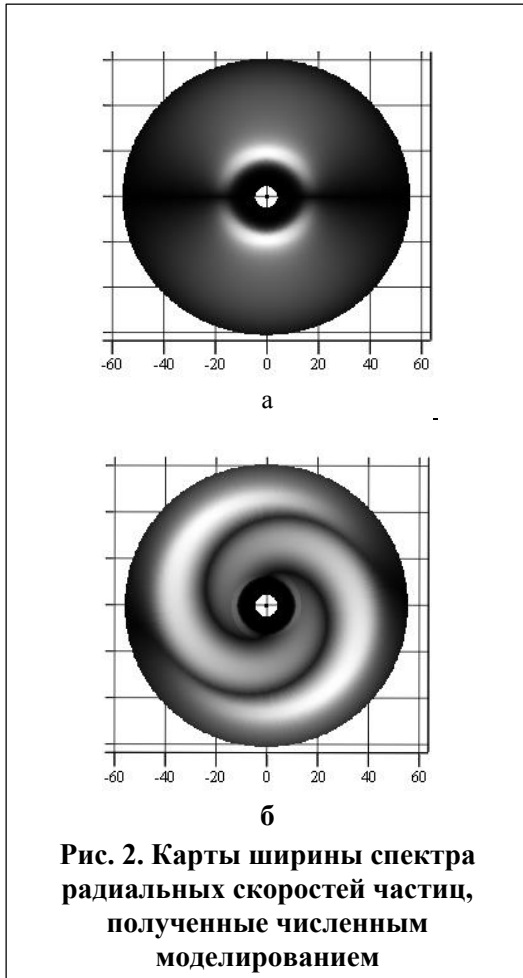


Рис. 2. Карты ширины спектра радиальных скоростей частиц, полученные численным моделированием

сделано на рис. 1 а. Слой со сдвигом ветра существует на всех просматриваемых дальностях, но наблюдается только с того ее значения, при котором начинает выполняться упомянутое выше условие – размер элемента разрешения становится больше толщины слоя. Следовательно, искомая величина находится из формулы

$$\tilde{h} = R_{\text{мин}}\theta, \quad (3)$$

где $R_{\text{мин}}$ - минимальная дальность, при которой на вертикальном разрезе наблюдается слой аномально больших значений ширины спектра отражений,

θ - ширина диаграммы направленности антенны.

Второй случай, когда размеры элемента разрешения сравнимы или меньше толщины слоя, в котором наблюдается сдвиг ветра, сложнее и распадается на два варианта, отличающиеся отсутствием или наличием поворота вектора скорости частиц.

Если имеет место сдвиг без поворота, скорость во втором слое V_2 изменяется с высотой h по закону

$$V_2 = V_1 + W(h - h_1), \quad (4)$$

где V_1 - средняя скорость частиц в первом слое,

W - величина сдвига ветра,

h_1 - высота первого слоя.

Средняя частота сигнала, отраженного отдельно от каждого из слоев

$$F_1 = \frac{2V_1}{\lambda}, \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{2}{\lambda A} \int_{h_1}^{h_1+A} (V_1 + W(h - h_1)) dh, \quad (6)$$

где A – вертикальный размер участка разрешаемого объема, занятого частицами второго слоя (от h_1 до верхней границы элемента разрешения).

Ширина спектра отражений второго слоя определяется формулой

$$\sigma_2^2 = \frac{2}{\lambda} \left(\int_{h_1}^{h_1+A} (V_1 + W(h - h_1))^2 dh - F_2^2 \right) = \frac{A^2 W^2}{3\lambda^2}. \quad (7)$$

Подставляя (5), (6) и (7) в (1) находим ширину спектра суммарного сигнала и его максимальное значение, с помощью которого оцениваем сдвига ветра

$$\tilde{W} = \frac{\lambda(9\tilde{\sigma}_{\text{макс}}^2 - 3\tilde{\sigma}_1^2)^{1/2}}{2\tilde{A}}, \quad (8)$$

где R - дальность, на которой наблюдается максимальное значение параметра,

$R_{\text{мин}}$ - минимальная дальность, на которой наблюдается зона аномальной ширины спектра сигнала,

$$\tilde{A} = R(\text{Sin}\beta + \theta/2) - R_{\text{мин}}\text{Sin}\beta. \quad (9)$$

Более сложен случай, когда присутствует сдвиг ветра по направлению. Изменение радиальной скорости частиц с высотой во втором слое описывается формулой

$$V_2 = (V_1 + W(h - h_1))\text{Cos}(\gamma_1 + \delta(h - h_1)), \quad (10)$$

где γ_1 - направление ветра в первом слое,

δ – скорость поворота вектора скорости с высотой. Аналогично предыдущему случаю находим среднюю частоту спектра отражений второго слоя

$$F_2 = \frac{2V_1}{\lambda} \text{Cos} \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{\delta A}{2} \right) + \frac{AW}{\lambda} \text{Cos} \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3\delta A}{4} \right), \quad (11)$$

где φ – азимут антенны радиолокатора.

Если имеется сдвиг только по направлению, на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц появляется зона малых значений (выделена синим цветом на рис. 1) в виде спирали. Уравнение последней ищется, исходя из условия $F_1 = F_2$ и имеет вид

$$\varphi = \gamma_1 + \frac{\delta A}{4} + n\pi. \quad (12)$$

Наиболее удобный алгоритм оценивания скорости вращения δ оказывается следующим: берутся координаты двух принадлежащих спирали точек (φ_1, R_1) и (φ_2, R_2) и применяется формула

$$\tilde{\delta} = \frac{4(\varphi_1 - \varphi_2)}{(\beta + \theta/4)(R_1 - R_2)}. \quad (13)$$

Если же имеются сдвиг с поворотом, кроме зоны малых значений на карте появляются зоны аномально больших величин рассматриваемого параметра, также имеющих вид спирали. Описывающее их уравнение ищется теперь из условия максимума величины $F_1 - F_2$. Результирующая формула имеет вид

$$\varphi = \gamma_1 + \frac{\delta A}{4} + \frac{V_1 \delta}{W} + n\pi. \quad (14)$$

Отсюда следует, что, во-первых, данная спираль имеет ту же форму, что и спираль малых значений, только сдвинута относительно нее на некоторый постоянный угол и, во-вторых, ее вид не зависит от величины сдвига ветра по величине. Сам же этот сдвиг оценивается с помощью подстановки в формулу (1) величины $F_1 - F_2$, определяемой выражением

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{V_1^2 \delta^2 A}{W} + \frac{V_1 \delta A^2}{2} + AW \right). \quad (15)$$

Из приведенных вычислений следует, что решение обратной задачи существует и, измеряя параметры получившегося пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, можно определить характеристики сдвига, минуя промежуточный этап восстановления профиля ветра. При этом обнаруживается данное опасное явление в пределах высот, наиболее актуальных для обеспечения полетов авиации, и не требуется внесения каких-либо изменений в конструкцию, режим работы или программу первичной обработки информации радиолокатора. Для применения метода на практике достаточно разработки дополнительного программного модуля системы вторичной обработки радиолокационной информации.

Литература

1. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов. /Метеорология и гидрология, 2014, №2. С.92-100.
2. 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. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2013. С.66-83.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. О влиянии сдвига ветра на пространственное распределение ширины спектра радиолокационного сигнала / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 1 (21). С. 5-14.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Исследование зависимости пространственного распределения ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим

радиолокатором, от распределения ветра по высоте в пограничном слое атмосферы./Вестник РосНОУ, №10, 2015. С. 10-14.

5. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала. /Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург, 2013 г., с. 337-344.