

## Дистанционное зондирование сред

УДК 621.396

### МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СДВИГА ВЕТРА

### ПРИ ПОМОЩИ ДОПЛЕРОВСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА

#### **Денисенков Дмитрий Анатольевич**

преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения войск ФГКОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского».

*E-mail:* vka@mil.ru.

#### **Жуков Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник 32 отдела ВНИИ ФГКОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского».

*E-mail:* vuzhukov2002@list.ru.

*Адрес:* 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

#### **Первушин Радислав Валентинович**

кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых".

*Адрес:* 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

#### **Щукин Георгий Георгиевич**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения войск ФГКОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского».

*E-mail:* vka@mil.ru.

*Адрес:* 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

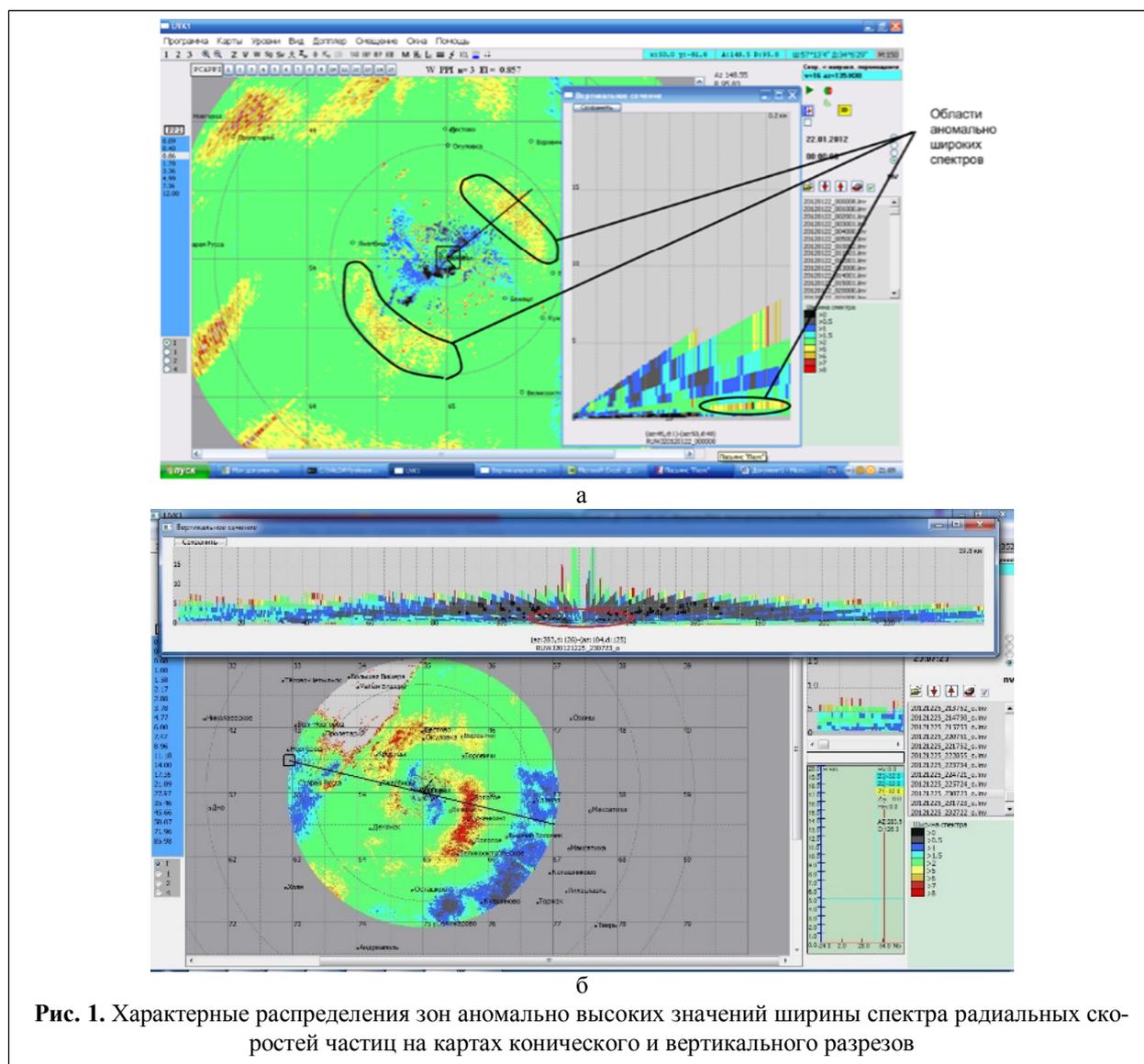
*Аннотация:* Исследуется возможность определения параметров вертикального сдвига ветра радиолокационным способом, основанным на анализе пространственного распределения оценок ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, получаемых доплеровским метеорологическим радиолокатором. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие правильность сделанных предположений о том, что некоторые характеристики указанного распределения тесно связаны с величиной сдвига ветра в наблюдаемой области пространства по величине и по направлению. Предлагается аналитическая модель зависимости упомянутых величин для различных возможных вариантов сдвига ветра и различных соотношений размеров элемента разрешения радиолокатора и масштабов области пространства, в которой существует искомый сдвиг. Решается обратная задача определения параметров сдвига ветра для каждого из указанных случаев.

*Ключевые слова:* ширина спектра, метеорологический радиолокатор, сдвиг ветра.

#### **Введение**

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 нали-

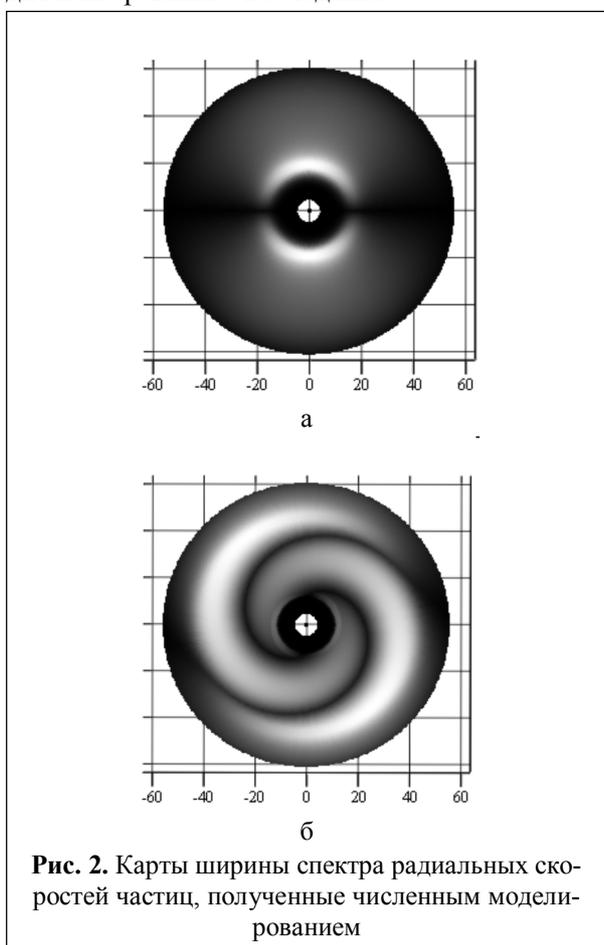
чии сдвига ветра на картах конического разреза данного параметра образуются характерные структуры, представленные на рис. 1.

### Результаты моделирования

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 anomalно 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.



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

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 двухмодаль-

ным, и ширина его спектра определяется выражением [5]

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

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 anomalно 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

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

где знак  $\tilde{\phantom{x}}$  означает оценку измеряемого параметра, а  $\tilde{\sigma}_{\text{макс}}^2$  – 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 anomalно больших значений, как это 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

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

где  $R_{\text{мин}}$  – минимальная дальность, при которой на вертикальном разрезе наблюдается слой anomalно больших значений ширины спектра отражений,  $\theta$  – 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 сдвиг ветра

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

где  $R$  - дальность, на которой наблюдается максимальное значение параметра,  $R_{\min}$  - минимальная дальность, на которой наблюдается зона аномальной ширины спектра сигнала,

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

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

$$V_2 = (V_1 + W(h - h_1))\cos(\gamma_1 + \delta(h - h_1)), \quad (10)$$

где  $\gamma_1$  - направление ветра в первом слое,  $\delta$  - скорость поворота вектора скорости с высотой. Аналогично предыдущему случаю находим среднюю частоту спектра отражений второго слоя

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

где  $\varphi$  - 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  $\delta$  оказывается следующим: берутся координаты двух принадлежащих спирали точек  $(\varphi_1, R_1)$  и  $(\varphi_2, R_2)$  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

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

### Заключение

Из приведенных вычислений следует, что решение обратной задачи существует и, измеряя параметры полученного 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 радиолока-

торов с двойной поляризацией. /Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 32. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГТМУ, 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.

Поступила 12 мая 2016 г.

English

### Wind shift detection method using the Doppler weather radar

**Dmitry Anatolyevich Denisenkov** – Lecturer, Department of technologies and Army geophysical support Military space academy named after A.F. Mozhaysky.

*E-mail:* vka@mil.ru.

**Vladimir Yuryevich Zhukov** – Candidate of Technical Sciences Senior research associate Department 32 VINI Military space academy named after A.F. Mozhaysky.

*E-mail:* vuzhukov2002@list.ru.

*Address:* 197082, St. Petersburg, Zhdanovskaya St., 13.

**Radislav Valentinovich Pervushin** – Candidate of Technical Sciences, Associate professor Technosphere Safety Department Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs.

*Address:* 602264, Murom, Orlovskaya St., 23.

**Georgy Georgiyevich Schukin** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of technologies and Army geophysical support Military space academy named after A.F. Mozhaysky.

*E-mail:* vka@mil.ru.

*Address:* 197082, St. Petersburg, Zhdanovskaya St., 13.

*Abstract:* The article is dedicated to a new method development of defining wind shift using the Doppler weather radar. Up until now, the solution of this task was assigned to the special equipment such as profilometers because possibilities of radars in this field were limited first of all due to resolution capacity and they did not meet requirements imposed by the airports. The proposed method does not require wind profile reconstruction and due to this the limits on admissible beam width of radar antenna pattern of the radar are removed, and it does not affect the operation mode in any way as the standard data is used which is obtained in each survey cycle. Wind shift parameters (specific changes of its scale and rotation angle) are to be defined according to the values of specific space estimate distributions of hydrometeor radial speed bandwidth arising in maps conic section of these estimates. The results of computational modeling confirming the proposed assumption of close connection the above named parameters are produced. The analytical model of the considered processes is developed for various types of the wind speed field non-uniformity (magnitude shift, direction shift and simultaneous

magnitude and direction shift) and for various ratios of the resolution element and the observed irregularity level. Wind shift magnitude evaluation algorithms for various possible of the existing weather conditions are proposed on the inverse solution basis.

*Key words:* bandwidth spectrum, weather radar, wind shift.

#### **References**

1. Zhukov V.Yu., Schukin G.G. Current state and trends of the Doppler weather radar network. - *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 2, p. 92-100.
2. Gotyur I.A., Devyatkin A.M., Zhukov V. Yu., Kuleshov Yu.V., Schukin G.G. Information opportunities of Doppler weather radars with dual polarization. - *Scientific notes of the Russian State Hydro meteorological University No. 32. Scientific-theoretical Joirnal.* - SPb.: RGGMU, 2013, p. 66-83.
3. Denisenkov D. A., Zhukov V. Yu. Wind shift effect on space distribution of radar signal bandwidth. - *Radio-tekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy.* 2016. No. 1 (21). P. 5-14.
4. Denisenkov D. A., Zhukov V. Yu. Dependence research of space distribution of signal bandwidth received by the weather radar on wind profile in the atmospheric boundary layer. *ROSNOU Bulletin*, No. 10, 2015, p. 10-14.
5. Zhukov V.Yu., Schukin G.G. On radar measurement features of hydrometeor radial speed with two-modal band of the signal reflected by them. - *Works of the XXIII the All-Russian symposium Radar research of environments*, St. Petersburg, 2013, p. 337-344.